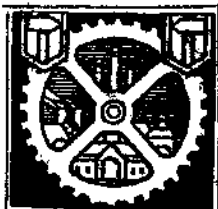


621.302

Т.91



ИНЖЕНЕРНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ
БИБЛИОТЕКА



ГРЭТЦ Л., проф.

621.302

Т.91

Государственное
техническое издательство

ТЕХНИКА СИЛЬНЫХ ТОКОВ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

Москва

ГРЭТЦ Л., проф.

ТЕХНИКА СИЛЬНЫХ ТОКОВ

Перевод с нем. инженера Я. М. Бриля под редакцией
инж. Е. В. Нитусова

с 475 фигурами в тексте

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА СССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА СССР



Гомельская
областная библиотека
имени Ленина

GRAETZ LEO, PROF.

STARKSTROMTECHNIK



Б. Серия 4

№ II — 56

Главкит № А — 75639.

Заказ № 724.

Тираж 5 100 экз. 30²/₄ л. л.

ПРЕДИСЛОВИЕ.

Настоящая книга представляет собою отдельный сборник глав по технике сильных токов, которые входят составной частью в изданное мною „Руководство по электричеству и магнетизму“, том V. С одной стороны, здесь подробно рассмотрены конструкции и расчет электрических машин постоянного и переменного тока и трансформаторов; при этом применялись различные, оправдавшие себя на практике, методы расчетов и графических представлений. С другой стороны, представлены теоретические и практические данные о преобразователях и выпрямителях, благодаря которым достигается переход от одной системы тока к другой. Наконец, в главе о силовых установках подробно рассмотрены схемы соединений всех этих элементов для снабжения больших районов энергией, а также и устройства, необходимые для передачи, безопасности и регулировки передаваемых мощностей. Благодаря этому данная книга заключает в своем относительно небольшом объеме все необходимые практические и теоретические сведения из области современной техники сильных токов, могущие заинтересовать круг читателей, для которых „Руководство по электричеству и магнетизму“ непосредственно не предназначено, а именно — читателей инженеров.

Так как составители этой книги являются сотрудниками фирмы Сименс-Шуккерт, то очень часто в книге рассматриваются конструкции этой мировой фирмы. Однако, во избежание односторонности, приводятся часто и решения, применяемые другими крупными электротехническими предприятиями в своих установках.

Л. Грэтц.

Мюнхен, март 1928 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ.

„Техника сильных токов“ проф. Грэтц имеет следующие ценные особенности:

1. Его сотрудниками при составлении книги были инженеры заводов Сименс-Шукерт.

2. В одной книге сосредоточено, правда в концентрированном виде, рассмотрение всех групп электрических машин.

Труд переводчика будет несомненно оправдан той пользой, какую получат от этой книги наши инженеры и техники, работающие в промышленности, а также студенты-электрики.

Недостатком книги следует считать некоторую невыдержанность ее построения. Надо пожалеть, что отсутствуют примеры расчета трансформатора и асинхронного двигателя.

Глава „Силовые станции“ переведена инж. Б. М. Тареевым.

Е. Нитусов.

I. Электрические машины.

ЧАСТЬ I.

Машины постоянного тока, синхронные машины переменного тока.

Инж. Г. Штессингер, Берлин—Сименсштадт.

Введение.

Электрические машины служат для преобразования энергии. В зависимости от рода преобразования энергии машины можно разделить на три группы:

1. Машины для превращения механической энергии в электрическую—генераторы.

2. Машины для превращения электрической энергии в механическую—двигатели.

3. Машины для преобразования электрической энергии одного вида в электрическую же энергию другого вида—трансформаторы, преобразователи, преобразователи частоты, выпрямители.

Во всех этих машинах (за исключением выпрямителей) преобразование энергии осуществляется при помощи третьего вида энергии, а именно магнитной. Таким образом, в каждой электрической машине имеются две электрические цепи (которые, вообще говоря, могут быть соединены вместе), связанные при помощи магнитного контура. На долю одной из этих электрических цепей выпадает задача создания магнитного потока.

По способу создания потока, сильно влияющему на конструкцию электрических машин, можно последние разделить на две группы:

1. У машин постоянного тока и у синхронных машин переменного тока магнитный поток создается в особых электромагнитах, присоединенных к источнику постоянного тока. Возбуждение электромагнитов поддается здесь произвольному изменению во время работы. Благодаря электромагнитам поток „жестко“ связан с определенными частями машины; этим самым, а также и благодаря возбуждению постоянным током, обуславливается синхронизм между движением поля по окружности якоря и скоростью вращения якоря машины. По своей сущности машина постоянного тока представляет собою синхронную многофазную машину, многофазные токи которой превращаются коллектором в постоянный ток. Эта группа машин рассматривается в первой части.

II. У асинхронных машин с вращающимся полем и у трансформаторов поток создается реактивным током питающей

сети. Поток в основном постоянен; он заранее обусловлен напряжением сети и устройством машины с электрической точки зрения. Эти машины рассматриваются во второй части. Здесь рассматриваются также и коллекторные машины переменного тока, имеющие признаки обеих групп, а потому рассматриваемые после изучения остальных машин.

Исторический обзор.

Первые попытки применения электричества для промышленных целей уже давно отошли в область предания и относятся больше к области физики. Там, где полезное применение ограничивается одними лишь опытами, там, конечно, не может быть речи о технике. Правда, больше ста лет тому назад уже умели создавать высокое напряжение (электростатические машины); мюнхенскому физiku Риттеру (Ritter) удалось еще до 1810 г. при помощи большой батареи создать между концами углей электрическую дугу и доказать химическое действие электричества. Однако, о технике, о широком промышленном применении все же пока не могло быть и речи.

Лишь постепенно устанавливалось понимание процессов, происходящих в электрической цепи, и лишь в 1826 г. сумел Ом сформулировать в своем знаменитом законе зависимость между напряжением, сопротивлением и силой тока. Несколько лет до этого (1820) Эрстед (Oersted) наблюдал отклонение магнитной стрелки под действием электрического тока и открыл давно предполагавшуюся зависимость между магнетизмом и электричеством. На этой взаимной зависимости между магнетизмом и электричеством построена вся современная электротехника.

Ампер (1775—1836) сделал дальнейшие выводы из открытия Эрстеда. Ампер доказал, что виток, по которому проходит ток, действует так же, как магнит, и что последовательным соединением таких витков в спираль удастся усилить это действие. Араго обнаружил, что заменой дерева, на котором расположены витки, мягким железом удастся значительно усилить магнитное действие последних. Таким образом был создан электромагнит, т. е. магнит непостоянной силы в отличие от существовавшего до того времени постоянного магнита.

Вскоре были также поставлены опыты с целью использования получаемых при помощи электромагнита больших усилий для силовых машин. Такие машины действовали путем простого включения и выключения электрической цепи. Первые из машин походили по своему внешнему устройству на паровую машину и имели даже самовозбуждение. Эти так называемые электромагнитные машины (Jakobi, Davenport, Page) являются прообразами современных электрических двигателей, в которых также происходит превращение электрической энергии в механическую при помощи магнетизма. Первые электрические двигатели получали электрическую энергию от гальванических батарей. Это оказалось, однако, невыгодным, так как цинк в элементах оказался слишком дорогим „горючим“ при усиленной работе совместно с углем. Проблема преобразования электрической энергии могла быть решена лишь позже, когда был найден источник электрической энергии, экономически более выгодный, чем гальваническая батарея.

Лишь Михаил Фарадей (Michael Faraday, 1791—1867) сумел своими блестящими изобретениями указать правильный путь к созданию пригодных источников тока. Со времени открытия электромагнетизма физики стали заниматься вопросом об обратимости этого явления: если электрический ток, проходя вокруг железа, превращает последнее в магнит, то

почему постоянный магнит не вызывает электрического тока в окружающих его витках?

Фарадей начал заниматься этим вопросом в 1822 г. Девять лет ему понадобилось для его решения. Передают, что в эти годы он постоянно носил с собою небольшой железный стержень с несколькими витками провода для того, чтобы все время фиксировать свое внимание на этой проблеме¹⁾. В 1831 г. он уже доказывал, что лишь при движении магнита по отношению к проводникам в последних создается электрическое напряжение. Благодаря такому открытию, он вскоре мог сформулировать все явления индукции.

Так возникло прочное основание, на котором можно было строить современное здание электротехники. Многообразие первых машин объясняется тем обстоятельством, что все они базировались только на принципе электрической индукции; в остальном каждый строил машины по-своему, пользуясь своим чутьем и опытом, так как метод расчета тогда еще не был создан из-за незнания физических процессов. В настоящее время, когда эти процессы подробно исследованы, машины различного происхождения отличаются незначительно; основная форма у них одна и та же.

Первые источники тока, построенные по индукционному принципу Фарадея, обладали подковообразными стальными магнитами, относительно которых вращали „якорь“ из мягкого железа. При этом вращении обоконца якоря меняли свои места относительно полюсов постоянного магнита. Благодаря непрерывной перемене полюсов возникало периодическое изменение магнитного потока в железе якоря, а тем самым и в витках, окружающих якорь. Таким образом, согласно принципу индукции, должно было индуцироваться напряжение. Последнее к тому же должно было быть переменным благодаря изменению направления магнитного потока. Такие источники тока были названы магнито-электрическими машинами, так как для создания электричества они требуют наличия магнетизма.

Для увеличения мощности этих машин постоянные магниты были вскоре заменены несколькими плоскими стальными магнитами, что давало возможность усилить намагничивание. Первое техническое применение таких машин имело место в 1857 г. Ноллет и ван-Малдерен (Nollet и van Malderen) построили в Брюсселе для общества „Альянс“ („Alliance“) машину переменного тока, предназначенную для освещения сигнальных башен. Она занимала пространство около 3 м³ и требовала 5 л. с. для пуска. Машина состояла из шести или восьми комплектов стальных магнитов, расположенных по окружности. Между их полюсами вращались плоские катушки из проводов.

Существенное улучшение в конструкцию магнито-электрических машин внес Вернер Сименс в 1854 г. (Werner Siemens) благодаря изобретенному им якорю, имеющему форму двойного Т (фиг. 1). Последний состоял из продолговатого железного цилиндра с двумя глубокими продольными пазами для укладки проводников. Весь якорь вращался между полюсами нескольких плоских стальных магнитов. Якорь типа двойного Т является прообразом распространенного в настоящее время в машиностроении барабанного якоря. Благодаря своей простоте и устойчивой конструкции такие магнитные индукторы сохранились там, где требуется готовый источник слабых переменных токов, как, например, в телеграфии,

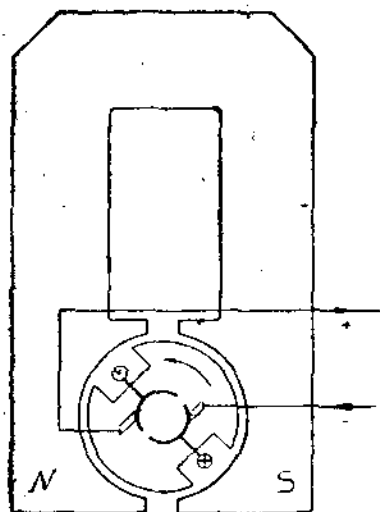
¹⁾ A. Rotth. Entwicklung der Strarkstromtechnik in ihren Hauptzügen. Selbstverlag der Siemens-Schuckert Werke, Berlin, 1922.

для подачи сигналов в службе движения на железных дорогах (индуктор с рукояткой); особенно же часто ими пользуются в настоящее время в качестве индукторов для зажигания в двигателях внутреннего сгорания у автомобилей и т. п.

Дальнейшим усовершенствованием явилось устройство двухпластинчатого коллектора, дающего возможность преобразовать переменный ток в выпрямленный, так называемый волнистый ток.

Несмотря на лучшее использование магнито-электрических машин при помощи якоря формы двойного Т, больших мощностей все же не удалось достигнуть. Причиной этому являлась слабость поля постоянных магнитов. Правда, была попытка увеличить мощность стальных магнитов путем увеличения их размеров. Однако, вскоре оказалось, что индукция не возрастает пропорционально размерам магнита. К тому же большие

магниты теряли свою силу относительно быстрее, чем малые. Таким образом стал вопрос о замене стальных магнитов уже известными к тому времени, значительно более сильными, электромагнитами. Первым шагом в этом направлении явился патент, заявленный Уитстоном (Wheatstone) в 1848 г. В этом патенте предлагалось заменить стальные магниты электромагнитами с посторонним возбуждением. В качестве источников тока для питания возбуждения могли быть применены гальванические батареи или, по предложению, усердно защищавшемуся Sin-
steden'ом, другие магнито-электрические машины с постоянными магнитами и двухпластинчатым коллектором. Такие двухмашинные агрегаты были неоднократно выполнены, однако имели значительный вес, так как машину возбуждения со стальными магнитами приходилось строить почти таких же размеров, как и главная машина.



Фиг. 1. Магнито-электрическая машина с якорем формы двойного Т.

Характерным для взглядов того времени является мнение, будто при помощи электрических машин можно создавать энергию без текущих расходов (в противоположность гальваническим батареям).

Расходы на создание энергии сводятся лишь к расходам на энергию, необходимую для приведения индукторов во вращательное движение¹⁾. Сформулированный в 1842 г. Робертом Майером (Robert Mayer) закон получения энергии еще не получил широкой известности, а мощности машин были еще относительно малы в сравнении с большими потерями на трение, так что факты не говорили еще с достаточной ясностью против этого ложного воззрения.

Решением, очень близким к окончательному решению, принятому и в настоящее время, является самовозбуждение, предложенное датчанином Нjorth (английский патент 1855 г.). Он предложил машину, которая должна одновременно иметь постоянные магниты и электромагниты, при чем первые должны служить для того, чтобы индуктировать в вращающихся обмотках первый импульс тока. Этот слабый ток пропускается

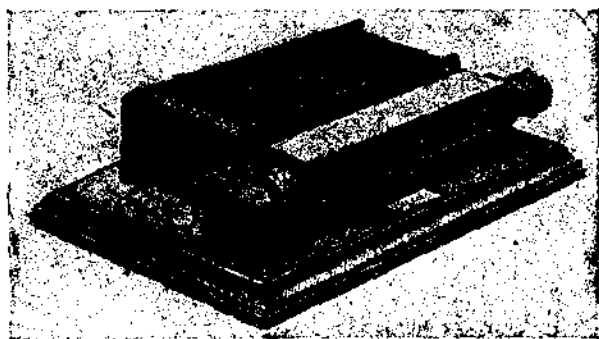
¹⁾ Sinsteden. Eine wesentliche Verstärkung des magnetelektrischen Rotations-Apparats usw. Pogg. Ann. 84, 187, 1851.

через обмотки электромагнитов, так что магнитный поток машины усиливается и ток, индуктированный в обмотке, возрастает.

Благодаря взаимодействию между индуктированным током и электромагнитом можно было бы достигнуть любой мощности. Из отдельных отрывков из его дневника, опубликованного несколько лет тому назад, видно, что он задумывался и над вопросом полного самовозбуждения. Однако, эту мысль он не довел до конца. К сожалению, Нjorth'у не удалось претворить в действительность безусловно плодотворную идею, заложенную в его патенте. Машина, построенная по его данным, работала неудовлетворительно и можно усомниться, работала ли бы она вообще. Нjorth'у недоставало живой связи с техникой, которая смогла бы сделать жизнеспособной его идею. Во всяком случае, благодаря своим неудачам, Нjorth при жизни не был признан. Его неудачи являются также причиной того, что им, насколько нам известно, ничто не внесено в историческое развитие динамомашин¹⁾.

Человеком, сочетавшим в себе наряду с теоретическими познаниями того времени также и практическое умение, был Вернер Сименс (Werner Siemens). Он и был призван решить эту проблему.

Уже с середины прошлого столетия было известно, что при питании обмотки якоря гальванической батареей магнитно-электрическая машина работает в качестве электродвигателя и что мощность последнего можно уве-



Фиг. 2. Первая динамо-электрическая машина Вернера Сименса.

лечить заменой стальных магнитов электромагнитами, обмотка которых соединена последовательно с обмоткой якоря. С другой стороны, уже Якоби (в Петербурге) доказал, что электродвигатели во время работы противодействуют питающему их источнику и что при увеличении их числа оборотов сила тока в батарее уменьшается.

Этим вопросом занимался Вернер Сименс осенью 1866 г. Он объяснил вышеописанное действие двигателя наличием противодействующего тока, пропорционального числу оборотов, и сделал отсюда вывод, что при перемене вращения под действием внешней силы индуктированный ток будет протекать в одном направлении с током батареи и будет его усиливать. Этот вывод вполне подтвердился на опыте (фиг. 2). Дальнейшим шагом явилось использование тока, индуктированного в машине, (после отключения батареи) для возбуждения ее электромагнитов. Это удалось вполне, и таким путем возник генератор, имевший, в отличие от прежних, самовозбуждающиеся электромагниты. Для пуска требовался лишь „толчок“, который давался, как описано выше, батареей или насаженными постоянными магнитами.

В дальнейших опытах Вернер Сименс обнаружил, что для создания этого первого импульса достаточно даже и магнетизма, остающегося в мягком железе электромагнитов (остаточный магнетизм). Слабый индуктиро-

¹⁾ A. Thomälen, Zur Geschichte der Dinamomaschine (Beiträge zur Geschichte der Technik u. Industrie Bd. 7, Springer, Berlin, 1916).

ванный ток, проходя через электромагниты, усиливает их магнетизм и благодаря такому взаимодействию между магнетизмом и электрическим током последний непрерывно увеличивается до пределов, определяемых магнитными свойствами машины, числом витков и омическим сопротивлением цепи.

Все эти соображения Вернер Сименс изложил в статье „О превращении механической энергии в электрическую без применения постоянных магнитов“. Эта статья была прочитана его другом и прежним учителем проф. Магнусом (Magnus) в Берлинской Академии Наук 17 января 1867 г. ¹⁾.

В этой статье Вернер Сименс называет предлагаемую им машину, динамо-электрической в отличие от магнито-электрической, так как в первой „механическая энергия превращается в электрический ток непосредственно, при чем магнетизм создается здесь одновременно, как бы в качестве побочного продукта“ ²⁾, тогда как у магнито-электрической машины требуется наличие постоянного магнетизма. В настоящее время представление о динамо-электрическом принципе несколько изменилось: под ним подразумевают именно самовозбуждение электромагнитов благодаря их взаимодействию с током якоря, что в свое время было известно также и Вернеру Сименсу, но рассматривалось им как явление хотя и отрадное, но побочное по отношению к основному принципу.

Несколько недель спустя, независимо от Вернера Сименса, предложил построенную им машину с шуитовым самовозбуждением также и Уитстон.

До тех пор, пока машины имели небольшие размеры (динамо-электрические зажигатели мин), они были вполне приемлемы. Однако, при попытке построить более мощные машины стали возникать трудности. Здесь на первом месте стояло затруднение с нагреванием массивного якоря. Вначале предполагали, что причиной нагревания являются вихревые токи в железном массиве. Были также сделаны попытки разделить железо якоря с целью уменьшения вихревых токов. Эти попытки, отчасти из-за недостаточного деления, не давали заметных результатов. Вернер Сименс поэтому стал искать причину нагревания железа в другом явлении, а именно в перемагничивании железа или, выражаясь его словами, в движении молекул железа. Так как в те времена против этого явления, именуемого теперь гистерезисом, электротехника была бессильна, то ограничились заботой о возможно лучшем отведении тепла и не отказывались даже от применения водяного охлаждения.

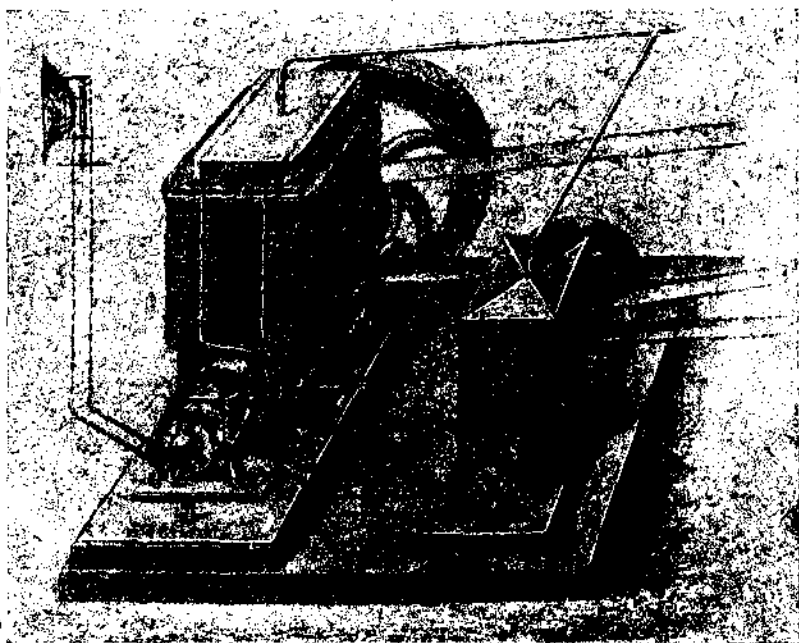
Первые электрические машины были предназначены почти исключительно для одиночного освещения при помощи вольтовых дуг. При этом сама осветительная машина представляла собою источник переменного тока с посторонним возбуждением и с якорем формы двойного Т. В качестве возбуждательной машины служила динамо-электрическая машина с якорем формы двойного Т и двухпластинчатым коллектором. Обе машины имели водяное охлаждение (фиг. 3). Здесь вскоре сказался недостаток двухпластинчатого коллектора при крупных мощностях. На таком коллекторе возникал значительный огонь, в особенности при колебаниях нагрузки, что вызывало усиленное обгорание углей.

Значительную помощь в этом деле оказал Грамм (Gramme). В 1870 г. он впервые применил для динамо-электрической машины кольцевую обмотку,

¹⁾ W. Siemens. Wissenschaftliche u. technische Arbeiten, S. 208, Springer, Berlin, 1889.

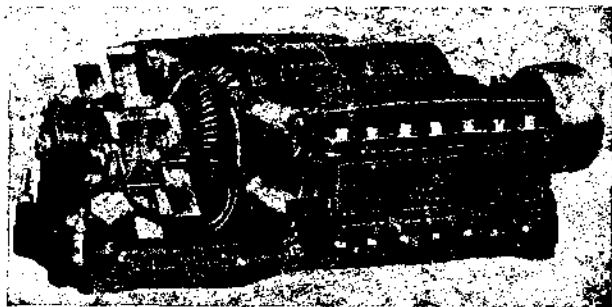
²⁾ W. Siemens. Gesammelte Abhandlungen und Vorträge, S. 496. Springer, Berlin, 1881.

предложенную Пачинотти (Pacinotti) еще в 1860 г. При кольцевой обмотке индуктируемые провода соединены между собою в одну замкнутую на себя спираль, намотанную на кольцо из мягкого железа (или из железных прутьев для уменьшения вихревых токов). От спирали, на оди-



Фиг. 3. Машина переменного тока с отдельным возбудителем, построенная в 1868 г.

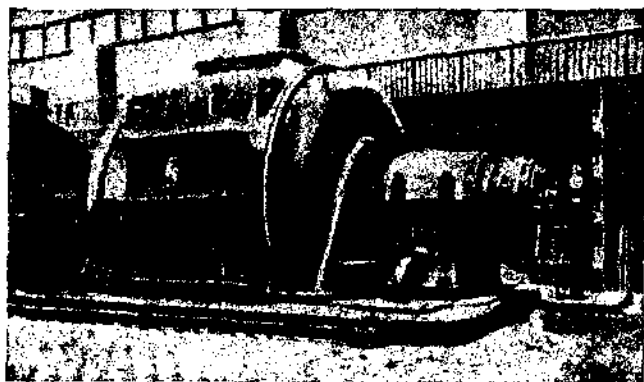
наковых расстояниях по окружности кольца, сделано несколько ответвлений, присоединенных к соответствующим пластинкам коллектора. Этим достигается то, что ток меняет свое направление не одновременно во всей обмотке (как в якоре формы двойного Т), а лишь в некоторой части ее, расположенной между обеими коллекторными пластинками, замкнутыми при помощи щеток накоротко, чем достигается соответственное уменьшение огня под щетками. Еще одно преимущество кольцевой обмотки — это более равномерное напряжение у зажимов, которое колеблется тем меньше, чем больше подразделение обмотки.



Фиг. 4. Машина постоянного тока с барабанным якорем, построенная в 1875 г.

Вместо кольцевого якоря Гефнер-Альтенек (Hefner-Alteneck), руководивший в то время конструкторским бюро у Сименса и Гальске (Siemens u. Halske), предложил барабанный якорь (1872) (фиг. 4), постепенно вытеснивший кольцевой якорь и применяемый в электромашиностроении еще по

настоящее время. Барабанную обмотку можно рассматривать как дальнейшее развитие якоря формы двойного Т, а именно в сторону более равномерного распределения обмотки по окружности якоря. Она обладает, следовательно, и преимуществами распределенной обмотки, как кольцевая обмотка, но имеет в сравнении с последней то преимущество, что в ней все проводники расположены по внешней окружности якоря и подвергаются индукции, тогда как у кольцевой обмотки половина проводников служит в качестве соединяющих проводов и расположена внутри якоря, в ненамагниченной его части. Еще одно значительное преимущество оказалось у барабанной обмотки в дальнейшем, когда для больших мощностей необходимо было перейти от гладкого якоря к якорю с пазами для лучшего укрепления в нем проводов. Здесь представилось возможным легко изготовить отдельные катушки вне якоря, на шаблонах, и в готовом виде их укладывать в пазы машины, тогда как у кольцевой обмотки неизбежно кропотливое протягивание обмотки через кольцо. Именно это обстоятельство и являлось решающим при выборе барабанной обмотки для всех современных электрических машин.



Фиг. 5. Трехфазный турбогенератор на 60 000 kVA.

В семидесятых годах еще не было достаточно точных методов для предварительного расчета электрических машин. Особенно трудным представлялось вначале угадывание желательного напряжения, так как зависимость последнего от возбуждения магнитов еще не была ясна. Машины строились на основании опытных данных, а потому неизбежны были разочарования. И в этом вопросе Вернер Сименс внес ясность своими дополнительными исследованиями в области теории электромагнетизма, о которых он сделал доклад в 1881 и 1884 г. в Берлинской Академии Наук. Здесь он развивает мысль о замкнутом магнитном силовом потоке, изменяющемся по закону, аналогичному закону Ома (закон Ома для магнетизма). Это давало возможность, зная магнитное сопротивление пути индукционных линий, состоящего из железа и воздуха, и магнитодвижущую силу проводящей ток обмотки магнитов, определить магнитный поток, а тем самым и индуктированную ЭДС.

Это вывело электрическую машину из ее детского возраста. При построении машин решающими факторами не являлись уже одни только опыты и испытания. Теперь представлялось возможным предъявлять к машинам разнообразные требования, опираясь при этом на предварительный расчет размеров машины.

Следующие годы проходили под знаком дальнейшего улучшения машин и увеличения их мощностей. Новые области применения выдвигали новые требования как в электрическом, так и в механическом отношениях. Многолетняя, неустанная совместная деятельность техники и науки привела электрические машины к тем высоким качествам, которые им свойственны в настоящее время (фиг. 5).

А. Машина постоянного тока ¹⁾.

§ 1. Физические основы.

Как уже было упомянуто во введении, превращение механической энергии в электрическую осуществляется в новейших машинах при помощи электромагнитной индукции. Подробное исследование явлений индукции завело бы нас слишком далеко. Ограничимся поэтому лишь изложением того, что находится в тесной связи с процессами в электрических машинах.

Закон, положенный в основу теории электромагнитной индукции, Фарадея-Максвелла, гласит: изменения магнитного потока создают электрическое поле в проводнике, охватывающем этот поток. В количественном отношении это электрическое поле пропорционально изменению магнитного потока во времени:

$$\Phi(\mathcal{E} - \mathcal{E}_s) dt = -\frac{d\Psi}{dt}, \dots \dots \dots (1)$$

где $\mathcal{E}$ —сила электрического поля в отдельных частях замкнутого пути, по которому распространяется интегрирование, $\mathcal{E}_s$ —свойственная самому контуру сила поля (химического или термического происхождения); Ψ —индукционный поток, заключающийся в замкнутом пути, по которому производится интегрирование.

В обычном изложении закон индукции (ур. 1) гласит: электрическое напряжение обхода (контур) равно магнитному спаду.

Как видно из ур. (1), каждое изменение магнитного потока можно расценивать как электродвижущую силу, так называемую индуцированную электродвижущую силу E .

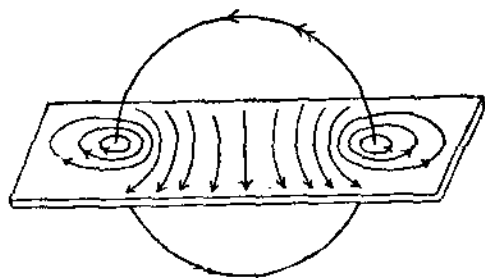
$$E = -\frac{d\Psi}{dt} \dots \dots \dots (2)$$

Если измерять здесь индукционный поток Ψ в вольт-секундах = 10^8 максвеллов, а время t —в секундах то получится индуцированная ЭДС в вольтах, соответствующая изменению магнитного потока.

В смысле направления, индуцированная ЭДС, как и вообще в электрических и магнитных явлениях, перпендикулярна индукционному потоку. Поток называется положительным, если он создается положительным током по правилу пловца, предложенному Ампером ²⁾ (фиг. 6). По закону Ленца индуцированная ЭДС направлена всегда так, что вызываемый ею ток противодействует изменению магнитного потока.

Этим объясняется то обстоятельство, что в ур. (2) индуцированная ЭДС равна отрицательному значению изменения индукционного потока.

В электрических машинах обычно многие витки соединяются в одну катушку. При этом потоки, охватываемые отдельными витками (потоки



Фиг. 6. Направления силы тока и магнитного потока.

¹⁾ R. Richter, Elektrische Maschinen. Bd I, Springer, Berlin, 1924.—Arnold la Cour. Die Gleichstrommaschine I u II, Springer, Berlin 1919.—M. Schenkel. Elektrotechnik. Weber, Leipzig 1923.

²⁾ Handbuch d. Elektr. u. d. Magn. 4, S. 939 f., Barth., Leipzig.

витков Φ), могут, вообще говоря, быть различными. Под величиной Ψ понимают тогда поток катушки, равный сумме потоков отдельных витков:

$$\Psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \dots + \Phi_{n-1} + \Phi_n = \sum_{n=1}^w \Phi_n \dots \dots \dots (3)$$

Индуктированная ЭДС такой катушки будет равна:

$$E = - \sum_{n=1}^w \frac{d\Phi_n}{dt} \dots \dots \dots (4)$$

Если потоки отдельных витков катушки равны между собою, как это бывает на практике в тех случаях, когда все витки катушки расположены в общих пазах, то мы будем иметь:

$$E = -w \frac{d\Phi}{dt} \dots \dots \dots (5)$$

Изменение охватываемого потока может протекать во времени, в случае если катушки находятся в покое относительно поля, и в пространстве — в случае, если поток постоянен во времени.

В общем случае будут иметь место оба вида изменения потока, так что:

$$d\Psi = \frac{\partial \Psi}{\partial t} dt + \frac{\partial \Psi}{\partial x} dx \dots \dots \dots (6)$$

Таким образом, индуктированная ЭДС будет равна¹⁾:

$$E = - \left(\frac{\partial \Psi}{\partial t} + \frac{\partial \Psi}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \right), \dots \dots \dots (7)$$

или, введя величину скорости $v = \frac{dx}{dt}$, мы имеем:

$$E = - \left(\frac{\partial \Psi}{\partial t} + v \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) \dots \dots \dots (8)$$

Первый член правой половины ур. (8) называется ЭДС покоя и находит свое применение, главным образом, в трансформаторах. Источники же тока представляют собою главную область применения ЭДС движения, которая выражена второй половиной правой части ур-ия (8). Получаемая при этом механическая энергия используется для того, чтобы привести в движение части машины, создающие индукционный поток (полюсы магнитов), относительно обмотки, в которой должна индуцироваться ЭДС. Поэтому во всех источниках тока имеется неподвижная и подвижная (вращающаяся) части, из которых каждая имеет обмотку. Так как вся суть только в относительном движении между обмоткой, создающей потоки, индуктированной обмоткой (т. е. вся суть в изменении потока), то в принципе безразлично, будут ли магнитные полюса представлять подвижную или неподвижную части машины. Чисто конструктивные соображения легли в основу выбора неподвижной магнитной системы для машин постоянного тока и подвижной (прикрепленной к якору) магнитной системы для однофазных и трехфазных синхронных генераторов. Подробнее мы остановимся на этом позже.

Уравнение для ЭДС движения можно написать в более удобном, особенно для электрических машин, виде. Разъясним это на примере.

¹⁾ А. Fraenkel. Theorie der Wechselströme, Springer, Berlin, 1921.

На фиг. 7 представлена металлическая вилка $FEDC$, с которой соприкасается проводник AB , передвигающийся в направлении v . При этом образуется замкнутый контур $ABED$. Направление индукции B_n мы принимаем перпендикулярным к замкнутому контуру и идущим от нас к чертежу (что соответствует южному полюсу на фигуре). Если передвинуть проводник AB со скоростью v на расстояние dx , т. е. привести проводник в положение $A'B'$, то изменение индукционного потока¹⁾ выразится:

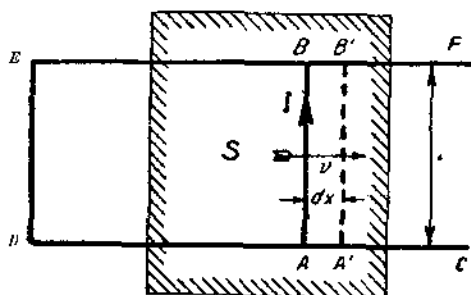
$$d\Phi = B_n \cdot l \cdot dx \dots \dots \dots (9)$$

Следовательно,

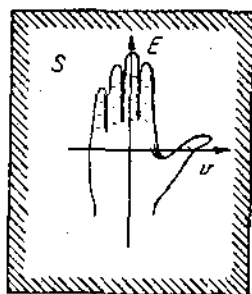
$$E_b = -v \frac{d\Phi}{dx} \cdot 10^{-8} = -v \cdot B_n \cdot l \cdot 10^{-8} \dots \dots \dots (10)$$

Здесь величина Φ выражена в максвеллах и B_n — в гауссах. Отрицательный знак характеризует только направление величины E_b (ср. также с началом параграфа).

Как уже упомянуто, индуктированная ЭДС направлена так, что создаваемый ею ток противодействует изменению (в данном случае—увеличению) магнитного потока (закон Ленца).



Фиг. 7. Получение тока передвижением проводника в магнитном поле.



Фиг. 8. Правило правой руки.

Для быстрого определения направления индуктированной ЭДС удобно пользоваться так называемым правилом правой руки (фиг. 8). Оно гласит: Если поместить правую руку относительно индуктируемого проводника так, чтобы индукционные линии (имеющие направление от северного полюса к южному) входили в ладонь, а большой палец указывал направление движения проводника относительно поля, то остальные пальцы будут показывать направление индуктированной ЭДС в проводнике.

При прохождении электрического тока по замкнутой цепи расходуется электрическая энергия. Согласно принципу сохранения энергии, к замкнутой цепи, в которой индуктируется ЭДС, а следовательно, проходит ток, должна быть извне подведена энергия в каком-либо виде. Эта энергия не может быть изъята из магнитного поля, так как величина последнего остается после прохождения индуктированного проводника таким же, как и до его прохождения. Остается лишь та механическая энергия, та работа, которую нужно употребить на движение токонесящего проводника в магнитном поле и которая компенсируется работой

¹⁾ В рассматриваемом случае $\Psi = \Phi$, так как мы имеем дело лишь с одним витком.

электричества в замкнутой цепи. Отсюда можно сделать заключение о противодействующей силе, которую нужно преодолеть при движении токонесущего проводника в магнитном поле. Здесь применимо правило Ленца: "При движении проводника в магнитном поле индуцированный ток направлен так, что пондеромоторное усилие поля, взаимодействующее с этим током, тормозит движение ¹⁾).

Приравняв электрически отдаваемую работу к получаемой механической работе, мы можем определить усилие, необходимое для движения токонесущего проводника в магнитном поле, а тем самым и равное, но противоположное ему пондеромоторное усилие, с которым магнитное поле воздействует на токонесущий проводник.

Если в проводнике, движущемся в магнитном поле, создается ЭДС E_b вольт, под действием которой, при определенных постоянных цепи, проходит ток в I ампер, то электрическая работа за время dt выразится:

$$dA_{el} = E_b \cdot I \cdot dt \text{ джоулей} \quad \dots \dots \dots (11)$$

Равная ей механическая работа выразится поэтому (совместно с ур. 10):

$$\begin{aligned} dA_m = dA_{el} &= -v \cdot B_n \cdot l \cdot I \cdot dt \cdot 10^{-8} \text{ джоулей} = \\ &= -B_n \cdot I \cdot l \cdot dx \cdot 10^{-8} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (12)$$

Усилие, необходимое для движения проводника, равно

$$\begin{aligned} K_m = \frac{dA_m}{dx} &= -B_n \cdot I \cdot l \cdot 10^{-8} \text{ джоулей/см} \\ &= -B_n \cdot I \cdot l \cdot 10^{-1} \text{ дин} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (13)$$

Таким образом, пондеромоторное противодействующее усилие, действующее на токонесущий проводник, равно:

$$K_p = B_n \cdot I \cdot l \cdot 10^{-1} \text{ дин} \quad \dots \dots \dots (14)$$

При одинаковом поле и силе тока это усилие имеет направление, противоположное механическому усилию, необходимому для создания в этом поле потребной силы тока.

Если к цепи, представленной на фиг. 7, приложить напряжение извне так, чтобы ток проходил в указанном направлении, то проводник при данном направлении поля будет перемещаться против направления стрелки, т. е., следовательно, справа налево.

Для определения направления движения токонесущего проводника в магнитном поле пользуются mnemonicским правилом левой руки:

Если к токонесущему проводнику приложить левую руку так, чтобы индукционные линии (направление их от северного полюса к южному) входили в ладонь, а вытянутые пальцы показывали направление тока, то вытянутый большой палец показывает направление возникшего движения проводника относительно поля.

Для токонесущей катушки из w витков, находящейся в магнитном поле, можно определить пондеромоторное усилие так же, как и выше. Лучше всего исходить здесь из общего ур. (5) или ур. (8):

$$E_b = -v \frac{d\Phi}{dx} \cdot w \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \quad \dots \dots \dots (15)$$

$$dA_m = E_b \cdot I \cdot dt = -w \cdot \frac{d\Phi}{dx} \cdot I \cdot dx \cdot 10^{-8} \text{ джоулей}, \quad \dots \dots \dots (16)$$

¹⁾ Handbuch d. Elektr. u. d. Magn. 4 S. 1277. ff, Barth, Leipzig.

$$K_m = \frac{dA_m}{dx} = -w \cdot \frac{d\Phi}{dx} \cdot I \cdot 10^{-8} \text{ джоулей,} \quad (17)$$

$$K_p = -K_m = w \frac{d\Phi}{dx} \cdot I \cdot 10^{-1} \text{ дин}$$

Пондеромоторное усилие, следовательно, пропорционально числу витков катушки, проходящему току и изменению потока в витке [или индукции в том месте, где находятся проводники, ур. (14)]. Положительный знак в правой части уравнения дает нам право сделать заключение, что усилие направлено так, что изменение потока становится положительным, т. е. что поток, охватываемый катушкой, возрастает. Под действием пондеромоторного усилия катушка движется до тех пор, пока охватываемый поток не доходит до максимума. Это достигается в том случае, если магнитный поток имеет то же направление, что и поток, созданный током катушки.

Благодаря движению в магнитном поле под влиянием пондеромоторного усилия в катушке индуктируется ЭДС. Как известно, последняя направлена так, что созданный ею ток противодействует изменению потока. Ток I , возникший в катушке под действием приложенного напряжения, вызывает магнитный поток, поддерживающий изменение другого магнитного потока. Следовательно, ЭДС, созданная при движении, направлена противоположно приложенному напряжению. Ее называют поэтому противоэлектродвижущей силой. Противо-ЭДС имеется всегда там, где электрическая энергия превращается в механическую. В обмотке, которая не имела бы сопротивления, эта противо-ЭДС равнялась бы приложенному напряжению.

Аналогично приведенному выше, можно формулировать также и явления при превращении электрической энергии в механическую.

Пондеромоторное усилие, действующее в магнитном поле на токонесущий проводник, направлено так, что вызванное этим усилием движение в магнитном поле индуктирует в проводнике электродвижущую силу, противодействующую напряжению, приложенному к этому проводнику.

Резюмируем все вышесказанное.

При превращении механической энергии в электрическую (работа генератором), благодаря взаимодействию между полем и созданным током, возникает противодействующее пондеромоторное усилие, равное (если пренебречь потерями) приложенному механическому усилию.

При превращении электрической энергии в механическую (работа двигателем) благодаря движению в поле в проводнике индуктируется электродвижущая противодействующая сила, равная (если пренебречь потерями) приложенному напряжению.

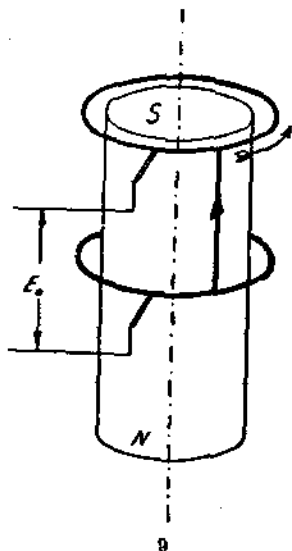
§ 2. Индуктированная электродвижущая сила.

Для создания постоянного напряжения следовало бы проводник приводить в движение в однородном (равномерно распределенном в пространстве) поле. Наиболее простым устройством подобного рода является провод, вращающийся около одного полюса стального магнита; постоянный ток может быть получен с контактных колец при помощи щеток (фиг. 9).

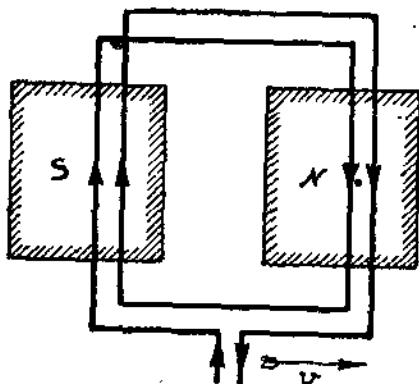
Источники постоянного тока, построенные по этому принципу, так называемые униполярные машины, выполнялись неоднократно, однако не получили никакого значения в современной технике. Причиной этому являются трудности при получении высоких напряжений путем последовательного соединения многих проводников. Каждый проводник пришлось

бы при этом соединить с двумя контактными кольцами, что представляет большие конструктивные затруднения¹⁾.

Во всех машинах, употребляемых в настоящее время, желательное напряжение получается благодаря последовательному соединению каждой пары проводов в один виток, а нескольких витков — в одну секцию. В машине укрепляются чередующиеся друг с другом северные и южные полюса, мимо которых движется секция (фиг. 10). Ширина секции подбирается так, чтобы она приблизительно равнялась расстоянию между серединами полюсов. Этим достигается то, что при симметричном распределении поля под полюсами обе секционные стороны находятся в местах с одинаковыми, хотя и противоположно направленными индукциями. Во всех проводниках секции индуктируются одинаковые ЭДС, которые, благодаря последовательному соединению проводников, складываются в одну ЭДС секции.



Фиг. 9. Принцип действия униполярной машины.



Фиг. 10. Принцип действия машины переменного тока.

Так как при таком устройстве отдельные проводники попеременно проходят под различными полюсами, то в них, а следовательно, и в секциях, будет индуцироваться переменная ЭДС, выпрямляемая затем коллектором.

Простым примером такого источника тока является катушка, вращающаяся в однородном поле между двумя полюсами (фиг. 11).¹⁾ Для точного определения положения катушки в поле зададимся определенными направлениями. Пусть, например, у какой-либо катушки (фиг. 12) произвольно выбраны начало A и конец E . Далее будем считать направление тока от A к E положительным.

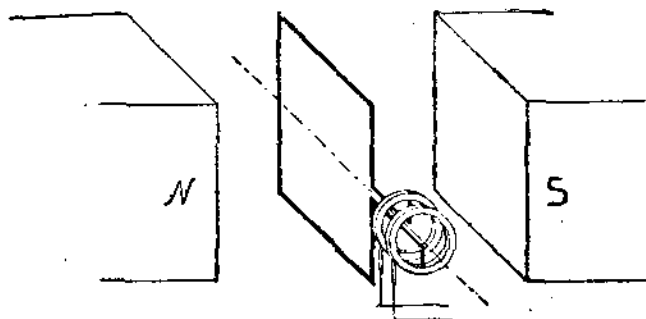
За положительное направление оси катушки примем направление потока, созданного положительным током (см. § 1). Таким образом, положение катушки в поле можно определить углом α между положительным направлением оси катушки и направлением поля.

При угле $\alpha=0$ катушка примет положение AB (фиг. 13) и охватит максимально возможный поток Ψ_m . При угле $\alpha=90^\circ$ поток, проходящий через катушку, будет $\Psi=0$. При дальнейшем увеличении угла α поток проходит через катушку в направлении, обратном прежнему направлению. Относи-

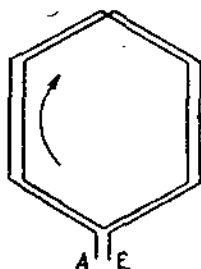
¹⁾ C. Trettin. Ueber Unipolarmaschinen. Dingers polytechnisches Journal 1913, S. 129.

тельно катушки он станет отрицательным. Максимальный отрицательный поток будет проходить через катушку при $\alpha=180^\circ$.

Начиная с этого момента, абсолютное значение потока начинает снова уменьшаться и становится равным $\Psi=0$ при $\alpha=270^\circ$. Между $\alpha=270^\circ$ и $\alpha=360^\circ$ направление поля снова соответствует произвольно выбран-



Фиг. 11. Источник тока.



Фиг. 12. Направление тока в катушке.

ному направлению оси, перпендикулярной к плоскости катушки; поток становится положительным и для $\alpha=360^\circ$ (т. е. когда катушка занимает свое первоначальное положение) достигает своего прежнего значения Ψ_m .

Для любого α мы имеем:

$$\Psi = \sum_{n=1}^m B F_n \cos \alpha = \Psi_m \cos \alpha \quad (19)$$

Следовательно, поток, проходящий через катушку, является косинусоидальной функцией угла α .

При вращении катушки с постоянной угловой скоростью ω поток, сопряженный с катушкой, станет также периодической функцией времени, так как $\alpha = \omega t$.

Мгновенные значения подобных функций обозначают обычно строчными буквами

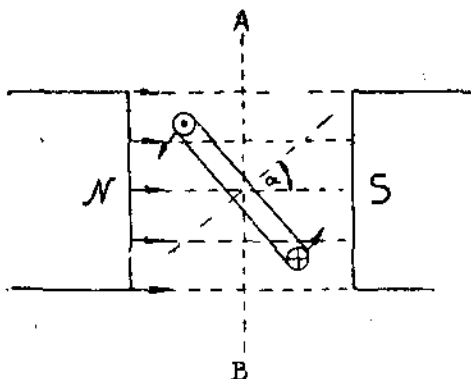
$$\psi = \Psi_m \cdot \cos \omega t \quad (20)$$

Мгновенное значение ЭДС, индуцированной в катушке, будет соответственно ур. (2) равно

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} = \omega \cdot \Psi_m \cdot \sin \omega t \quad (21)$$

Следовательно, и индуцированная ЭДС является периодической функцией времени, отстающей по фазе на четверть периода относительно потока (фиг. 14). Если подводить концы катушки не к контактным кольцам, как на фиг. 11, а к двухпластинчатому коллектору (фиг. 15), то каждый раз, когда индуцированная ЭДС будет достигать нулевого значения, концы катушек будут обмениваться щетками.

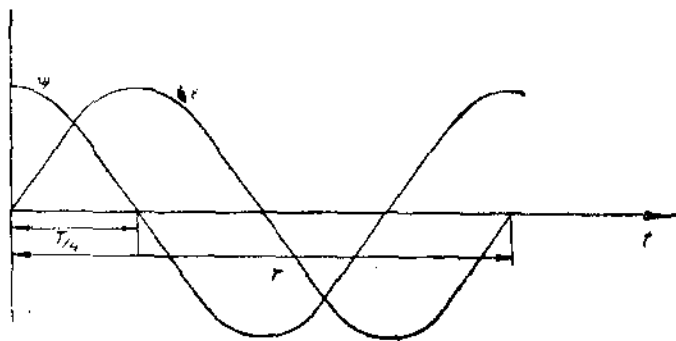
Благодаря этому индуцированная ЭДС никогда не может стать отрицательной, а будет колебаться между нулевым и максимальным значениями. При этом получается выпрямленный, так называемый пульсирующий или



Фиг. 13. Вращение катушки в равномерном поле.

волнистый ток (фиг. 16). Расположив обе стороны катушки в двух пазах железно-цилиндрического тела, мы получим якорь формы двойного Т Сименса (фиг. 1).

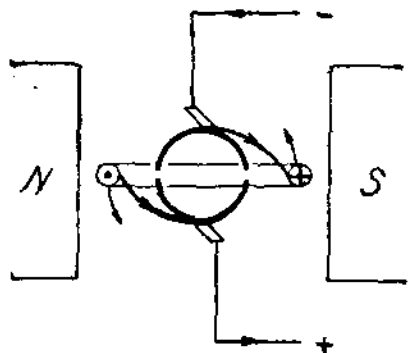
Недостатками такой обмотки являются периодическое колебание индуктированной ЭДС и трудности коммутации; дело в том, что здесь при каждой перемене направления тока замыкается накоротко вся обмотка, при чем ток должен менять направление во всей обмотке. Индук-



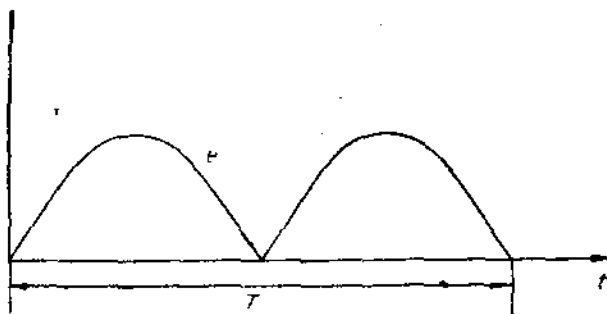
Фиг. 14. Поток и индуктированная ЭДС в зависимости от времени при равномерном вращении катушки.

тивность обмотки, состоящей из многих витков и утопленной в железе, здесь очень велика. Благодаря этому при измерении направления тока возникнут большие ЭДС самоиндукции, что вызовет сильный огонь под щетками.

Для устранения этих недостатков распределяют катушку (представляющую одно целое на якоре Сименса) равномерно по окружности якоря.



Фиг. 15. Двухпластинный коллектор.

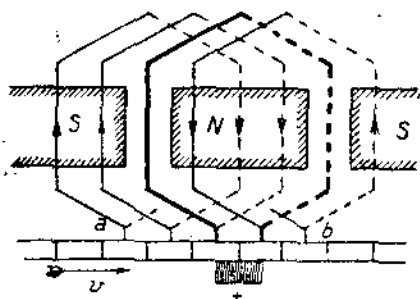


Фиг. 16. Форма кривой ЭДС при двухпластинном коллекторе.

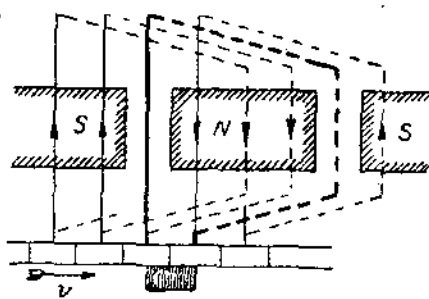
В зависимости от напряжения и от мощности машины можно, если это представляется необходимым, соединять несколько витков в частичные катушки (секции) и закладывать их вместе в пазы. Отдельные витки или секции соединяются в одну замкнутую обмотку. От каждого витка или секции делаются ответвления к пластинам коллектора (фиг. 17). По коллектору скользят щетки, замыкающие каждый раз накоротко одну или несколько рядом расположенных коллекторных пластин. Этим самым, при правильном положении щеток относительно полюсов, каждый раз замыкается накоротко виток или секция, проводники которой расположены

в нейтральной зоне, т. е. в геометрической середине между полюсами. Этот виток вычерчен более жирно на фиг. 17. Если считать полюса и щетки неподвижными, а обмотку и коллектор принять вращающимися в данном направлении (слева направо), то ЭДС, индуктированные в проводнике, будут направлены так, как указано на фиг. 17. При движении обмотки все витки поочередно проходят один за другим через короткое замыкание. При этом, как видно из фигуры, меняется направление тока в проводнике. Однако, ЭДС самоиндукции, вызванная изменением силы тока, т. е. так называемое напряжение коммутации, будет очень мало, так как число витков, одновременно замыкаемых накоротко при достаточном числе коллекторных пластин, относительно невелико, а потому невелика и индуктивность.

Обмотку якоря машины постоянного тока мы в дальнейшем рассмотрим подробнее. Здесь упомянем лишь о том, что должно быть заранее известно для определения величины индуктированной ЭДС.



Фиг. 17. Обмотка и коллектор.



Фиг. 18. Та же обмотка, что и на фиг. 17, но при сдвинутом коллекторе.

В новейших машинах постоянного тока обмотка якоря укладывается в пазы, при чем в каждом пазу расположены одна на другой две секционные стороны, принадлежащие двум различным секциям. На фиг. 17, например, все правые секционные стороны расположены в нижнем слое, а все левые секционные стороны — в верхнем (секционные стороны, лежащие в нижнем слое, начерчены пунктиром). При таком расположении секций обмотка называется двухслойной. Если сдвинуть коллектор влево на половину полюсного деления, то мы получим картину, представленную на фиг. 18, где длинные секционные стороны расположены в верхнем слое.

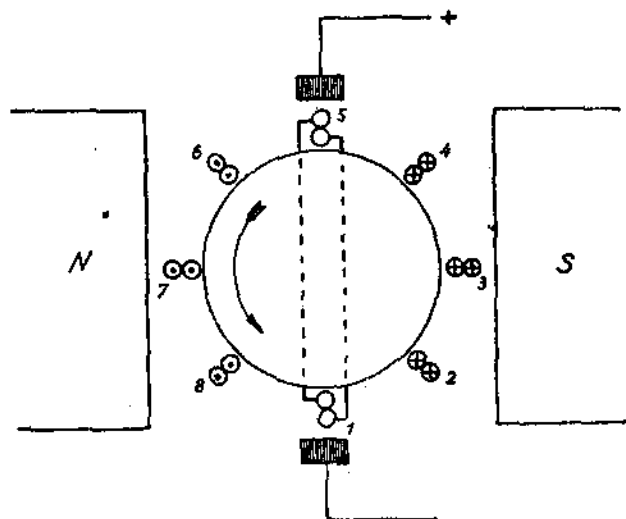
Далее примем, что коллектор совершенно отсутствует, а щетки скользят непосредственно по голым проводам верхнего слоя (фиг. 19). Такое расположение хотя и не соответствует действительному устройству машин постоянного тока, зато отличается чрезвычайной наглядностью.

В распределенной обмотке отдельные секции принимают все положения, которые можно достигнуть вращением обыкновенной катушки (фиг. 13).

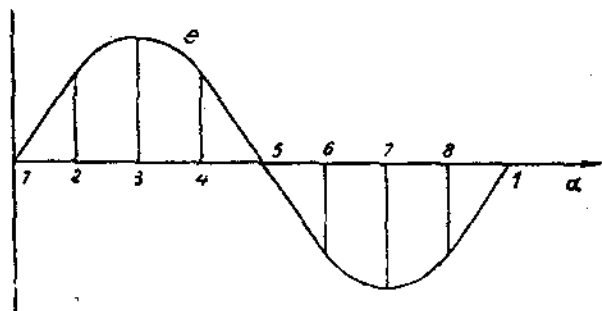
Для последней на фиг. 14 была нанесена индуктированная ЭДС в функции от времени при равномерном вращении.

Так как $\alpha = \omega t$, то кривая представляет одновременно индуктированную ЭДС при равномерном вращении также и в функции угла α . Таким образом, по этой кривой можно получить для каждого мгновения величины ЭДС, индуктированные в отдельных секциях. Ординаты на фиг. 20 дают, следовательно, мгновенные значения индуктированных ЭДС в соот-

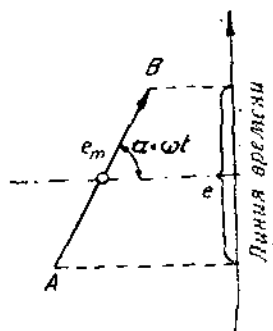
ветствующих по номерам секций, представленных на фиг. 19. Так как все отдельные секции замкнутой распределенной обмотки последовательно соединены между собою, то ЭДС, индуцированная в этих секциях, складывается. Как в этом легко убедиться из фиг. 20, сумма положительных ЭДС одной половины обмотки равна сумме отрицательных ЭДС другой половины обмотки. Результирующая ЭДС в замкнутой равномерно распределенной обмотке равна, следовательно, нулю; таким образом, даже при вращении обмотки в магнитном поле, ток в ней будет отсутствовать.



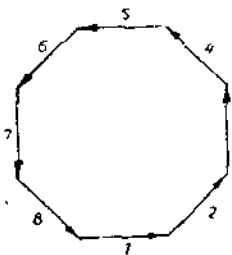
Фиг. 19. Разрез обмотки фиг. 18.



Фиг. 20. Мгновенные значения индуцированной ЭДС в секциях фиг. 19.



Фиг. 21. Мгновенное значение, как проекция вектора.



Фиг. 22. Многоугольник напряжений.

Если индуцированная ЭДС e секции представляет собою синусоидальную функцию времени (или угла $\alpha = \omega t$ при равномерном вращении обмотки), то ее можно представить в виде проекции на неподвижную линию времени вектора AB , вращающегося с угловой скоростью ω (при двухполюсной машине) и равного максимальному значению индуцированной ЭДС (фиг. 21). При замкнутой равномерно распределенной обмотке векторы отдельных секций складываются в один замкнутый многоугольник, так называемый многоугольник напряжений обмотки (фиг. 22).

Рассмотрим замкнутую обмотку в качестве контура, имеющего положительное направление, совпадающее с направлением линии времени. В этом случае из многоугольника напряжений можно убедиться, что в одной

половине контура (секции 2, 3, 4) создается положительная ЭДС, а в другой половине (6, 7, 8) — равная первой, но отрицательная ЭДС. Эти ЭДС уравнивают друг друга, как два одинаковых гальванических элемента, соединенных друг против друга (фиг. 23). При этом в цепи ток отсутствует.

Если же по обмотке в нейтральной ее зоне будут скользить щетки (фиг. 24), замкнутые через какое-либо внешнее сопротивление, то от одной щетки к другой начинает проходить ток. Обе ветви обмотки действуют как два параллельно соединенных гальванических элемента. Для определения ЭДС в цепи нагрузки достаточно, следовательно, рассмотреть одну ветвь обмотки, или одну полуобмотку, на фиг. 20.

В дальнейшем обозначим ЭДС одной ветви обмотки через E_0 . Тогда для обмотки, достаточно хорошо распределенной по окружности якоря, мы имеем:

$$E_0 = \sum_{\alpha=0}^{\alpha=\pi} e = E_{cp} \cdot w, \quad (22)$$

где e — мгновенное значение ЭДС индуктированной в одном витке, а w — число последовательно соединенных витков.

Пусть z — число проводов на окружности якоря, а $2a$ — число параллельно соединенных ветвей обмотки (в рассматриваемом случае $2a = 2$, фиг. 24). Тогда мы имеем.

$$w = \frac{z}{2 \cdot 2a} \quad (23)$$

Если $e = f(\alpha)$ представляет собою синусоидальную функцию (что имеет место в случае вращения в однородном поле равномерно распределенной обмотки без железного якоря), то мы будем иметь:

$$E_{cp} = \frac{2}{\pi} \cdot E_m \quad (24)$$

Из ур. (21) мы имеем для одного витка:

$$E_m = \omega \cdot \Phi_m \quad (25)$$

Следовательно:

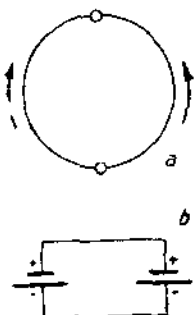
$$E_0 = \frac{2}{\pi} \cdot \omega \cdot \Phi_m \cdot \frac{z}{4a} \quad (26)$$

Обозначив через T время одного полного периода в секундах, мы получим (так как $\alpha = \omega t$):

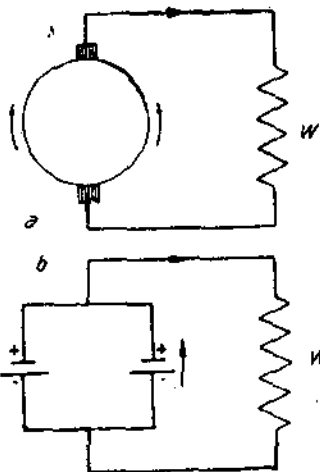
$$2\pi = \omega \cdot T \quad (27)$$

Обратное значение величины T представляет собою число периодов в секунду или частоту

$$f = \frac{1}{T} = \frac{n \cdot p}{60} \quad (28)$$



Фиг. 23. Противоположность направлений ЭДС в коротко-замкнутой обмотке.



Фиг. 24. Параллельное соединение ветвей обмотки при нагрузке.

где n — число оборотов обмотки в минуту, p — число пар полюсов машины. Из ур. (27) и (28) следует:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot \frac{n \cdot p}{60} \quad (29)$$

Таким образом, согласно ур. (26) мы получим ЭДС

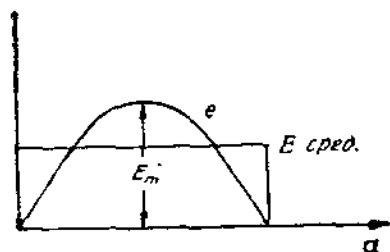
$$E_0 = \frac{2}{\pi} \cdot 2\pi \cdot \frac{n \cdot p}{60} \cdot Z \Phi_m \cdot \frac{z}{4a} = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot z \cdot \Phi_m \quad (30)$$

или измеряя поток в максвеллах (§ 1):

$$E_0 = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot \Phi_m \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \quad (30a)$$

Из многоугольника напряжений можно сделать еще и следующее заключение:

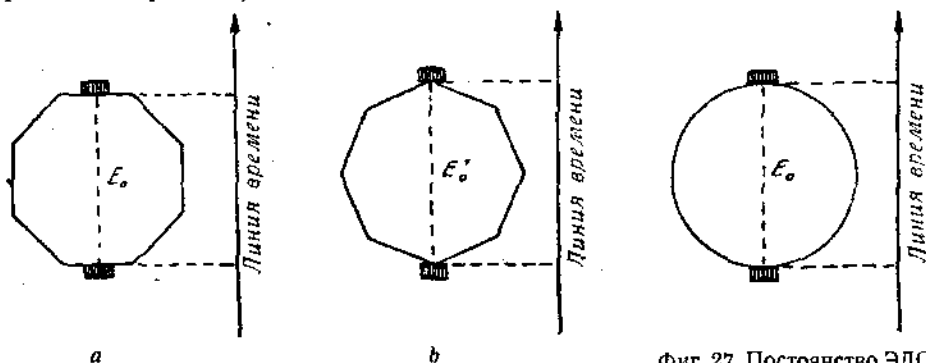
Для какого-либо заданного мгновения ЭДС в ветви обмотки равна сумме проекций отдельных векторов (или, что то же самое, проекции суммы векторов) на линию времени. Так как линия времени имеет направление оси щеток, то геометрическая сумма векторов между двумя щетками будет в то же время и ЭДС ветви.



Фиг. 25. Среднее значение индуктированной ЭДС.

Из сравнения многоугольников напряжения на фиг. 26 следует, что величина ЭДС при вращении обмотки колеблется между двумя предельными значениями E_0 и E'_0 . Это колебание будет тем меньше, чем более сильно распределена обмотка по окружности якоря. В обмотках, употребляемых в настоящее время, число пазов (а следовательно, и число отдельных векторов многоугольника напряжений) настолько велико, что колебание ЭДС ничтожно. При бесконечно распределенной обмотке многоугольник напряжений переходит в окружность напряжений, при чем ЭДС обмотки (на этот раз постоянная по своей величине) будет измеряться диаметром окружности напряжений (фиг. 27).

В сосредоточенной обмотке результирующая ЭДС равна алгебраической сумме ЭДС отдельных витков, так как все эти частичные ЭДС имеют, как векторы, одно и то же направление. При распределенной же обмотке результирующая ЭДС равна геометрической сумме ЭДС отдельных



Фиг. 26. Колебание ЭДС вследствие конечного числа пазов.

Фиг. 27. Постоянство ЭДС при бесконечном числе пазов.

В сосредоточенной обмотке результирующая ЭДС равна алгебраической сумме ЭДС отдельных витков, так как все эти частичные ЭДС имеют, как векторы, одно и то же направление. При распределенной же обмотке результирующая ЭДС равна геометрической сумме ЭДС отдельных

витков. Отношение результирующей ЭДС распределенной обмотки к результирующей ЭДС сосредоточенной обмотки (следовательно, отношение геометрической суммы ЭДС витков к алгебраической сумме ЭДС витков) называется обмоточным коэффициентом ξ . Для достаточно распределенной обмотки постоянного тока этот коэффициент, как это видно из окружности напряжений (фиг. 27), равен отношению диаметра к полуокружности:

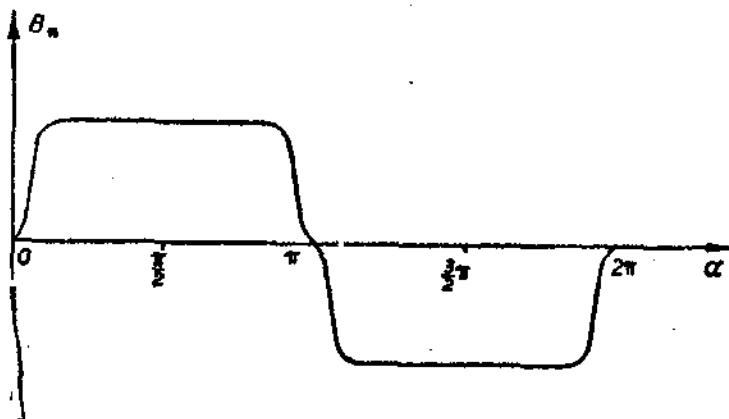
$$\xi = \frac{2}{\pi} \dots \dots \dots (31)$$

Согласно этому можно подсчитать ЭДС суммарной ветви обмотки

$$E_0 = \xi \cdot E_m \cdot \omega = \frac{2}{\pi} \cdot E_m \cdot \omega, \dots \dots \dots (32)$$

что ведет к ур. (26).

Вышеприведенные рассуждения относились к синусоидальному распределению по окружности якоря нормальной слагающей индукции, при чем и функция $e=f(\alpha)$ была принята синусоидальной. В новейших машинах



Фиг. 28. Кривая поля в машине постоянного тока.

стремятся к возможно большему потоку при относительно небольших индукциях, поэтому кривая индукции в функции от окружности якоря имеет плоскую форму (фиг. 28). Для витка, ширина которого равна полюсному делению (π), максимальный поток будет равен:

$$\Phi_m = \int_0^{\pi} B_n \cdot l \cdot dx, \dots \dots \dots (33)$$

т.е. площади кривой на фигуре.

При вращении нетли проводника в таком поле, изменение пронизывающего потока будет происходить по кривой, которая поддается математическому выражению не так просто, как синусоидальная кривая (фиг. 29). То же действительно и для кривой ЭДС, индуцированной в одном витке.

Для того чтобы для этого общего случая распределения поля определить ЭДС распределенной обмотки при равномерном вращении, мы будем исходить (как и выше) из среднего значения. В пределах одного полупериода каждый виток занимает последовательно все положения, занимаемые всеми витками в данное мгновение. Поэтому среднее значение

всех ЭДС, индуцированных в различных витках ветви обмотки, будет равно среднему из мгновенных значений ЭДС, индуцированных в одном и том же витке.

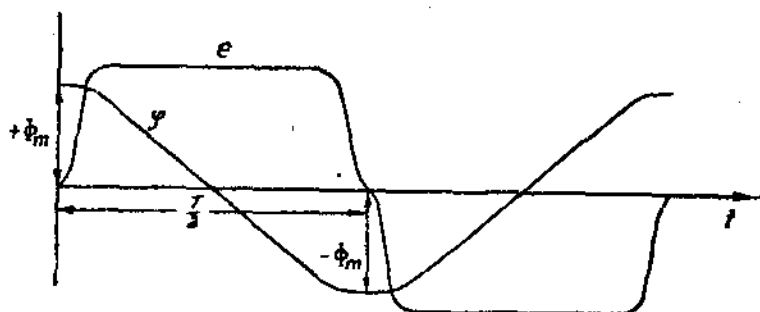
Последнее равно

$$E_{cp} = \frac{2}{T} \cdot \int_0^{\frac{T}{2}} e dt = \frac{2}{T} \cdot \int_{-\Phi}^{+\Phi} d\Phi = \frac{4}{T} \cdot \Phi_m \quad \dots (34)$$

Отсюда получается ЭДС ветви обмотки (ур. 22 и 28):

$$E_0 = 4 \cdot \omega \cdot \frac{n \cdot p}{60} \cdot \Phi_m \quad \dots (35)$$

что совместно с ур. (23) даст ур. (30a).



Фиг. 29. Поток и ЭДС в зависимости от времени при равномерном вращении катушки в поле из фиг. 28.

Величина Φ_m получается из ур. (33), а необходимую для этого кривую распределения индукции B_n по окружности якоря можно получить графически (при помощи отдельных кривых поля) из геометрической формы машины, или определить опытным путем из готовой машины.

Таким образом, ур. (30a) можно рассматривать как общее уравнение для подсчета ЭДС в машинах постоянного тока.

§ 3. Момент вращения.

Если через витки катушки (фиг. 13) пропустить ток I , то катушка будет поворачиваться под действием пондеромоторной силы. О направлении вращения мы судим из правила, приведенного в § 1. Величину усилия, действующего на катушку, можно определить из ур. (18):

$$K_p = \omega \cdot \frac{d\Phi}{dx} \cdot I \cdot 10^{-1} \text{ дин} \quad \dots (36)$$

или, так как $1 \text{ кг} = 981000 \text{ дин}$, то

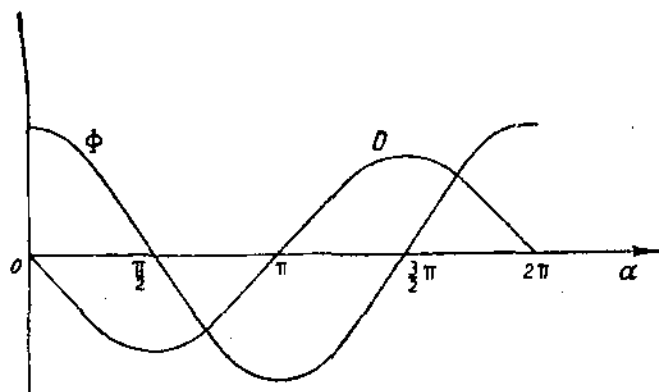
$$K_p = \frac{1}{0,00981} \cdot \omega \cdot \frac{d\Phi}{dx} \cdot I \cdot 10^{-8} \text{ кг} \quad \dots (37)$$

Пусть $\frac{d}{2} \text{ см} = \frac{d}{200} \text{ м}$ — радиус окружности, описываемой каждой активной частицей провода. Так $dx = d\alpha \cdot \frac{d}{2}$, то момент вращения, действующий на катушку, выразится:

$$D = \frac{1}{9,81} \cdot \omega \cdot \frac{d\Phi}{d\alpha} \cdot I \cdot 10^{-8} \text{ кгм} \quad \dots (38)$$

При косинусоидальной форме распределения потока в зависимости от α , момент вращения, действующий на катушку, будет, следовательно, синусоидальной функцией от α (фиг. 30).

Если катушку питать переменным током и привести ее во вращение так, чтобы за время одного периода переменного тока она совершала полный оборот, то за все время питания переменным током она сохранит эту установившуюся скорость вращения. Дело в том, что ток меняет каждый раз свое направление в тот момент, когда катушка достигает своего устойчивого положения. Благодаря этому положение становится неустойчивым. При дальнейшем вращении момент снова возрастает, имея при этом то же направление, что и раньше, так как ток изменил свое направление. Мы получаем, таким образом, момент вращения, всегда одинаково направленный, хотя и колеблющийся во времени между 0 и максимальным значением. Медленно изменяя частоту питающего переменного тока, мы будем соответственно изменять и скорость вращения. Катушка вращается синхронно с частотой переменного тока.



Фиг. 30. Поток и момент вращения.

Подводя концы катушки к двухпластинчатому коллектору и приложив к щеткам постоянное напряжение, мы получим аналогичное изменение момента вращения. Под влиянием момента вращения катушка стремится к устойчивому положению. В этом положении меняется направление тока, благодаря чему положение становится неустойчивым и момент продолжает вращать катушку в том же направлении (так как катушка из-за своей инерции переходит дальше своего неустойчивого положения) к новому устойчивому положению. Кривая моментов вращения в функции от времени имеет вид, представленный на фиг. 16.

Для получения равномерного во времени момента вращения распределяют обмотку равномерно по окружности якоря так, как указано в § 2. При питании такой обмотки постоянным током в каждой секции, благодаря взаимодействию магнитного потока и тока в якоре, возникает момент вращения. Суммарный момент вращения машины равен сумме моментов вращения отдельных секций. При бесконечно распределенной обмотке токораспределение относительно поля и щеток в любом положении якоря одинаково. Момент вращения машины постоянного тока является, следовательно, величиной постоянной.

Отдельным секциям обмотки можно приписать определенное направление, согласно принципам, изложенным на стр. 18. Примем, например, за начало секции то место, где проводник переходит от коллектора в верхний

слой; тогда концом секции будет то место, где проводник идет от нижнего слоя к коллектору. Если представить себе, что через секцию 5 на фиг. 19 проходит положительный ток (который, следовательно, при коллекторе, находящемся впереди плоскости бумаги, будет входить спереди в верхний слой и выходить спереди из нижнего слоя), то поток, созданный этим током, будет направлен в точности против потока полюсов. По отношению к секции 5 поток полюсов будет, следовательно, иметь отрицательный максимум; в секции, согласно фиг. 30, не будет создаваться никакого момента вращения. Так как токонесущая секция, как неоднократно было упомянуто, стремится охватить максимальный положительный поток, то секция 4 создаст момент вращения, действующий в направлении стрелки часов, так как при этом уменьшается абсолютное значение отрицательного потока и, следовательно, $\frac{d\Phi}{d\alpha} > 0$ (см. стр. 17). То же дей-

ствительно и для секции 3, где $\frac{d\Phi}{d\alpha}$, а тем самым и момент вращения, становятся максимальными, а также и для секции 2. В секции 1 при положительном токе пронизывающий магнитный поток достигает положительного максимума; момент вращения при этом $= 0$. В секциях 6, 7 и 8 ток будет отрицательным, так как он входит в нижний слой и выходит из верхнего слоя. Этим достигается действие момента вращения в том же направлении, что и в остальных секциях, в чем легко убедиться из условия $\frac{d\Phi}{d\alpha} > 0$. Если бы и в этих секциях ток проходил в положительном направлении, то моменты вращения этих секций и других (2, 3 и 4) взаимно уравнивались бы, так как их абсолютные значения равны между собою. Благодаря изменившемуся направлению тока в секциях 6, 7 и 8 моменты вращения обеих половин обмотки складываются. Достаточно поэтому для определения момента вращения рассматривать одну часть обмотки. Тогда для общего случая $2p$ полюсов мы получим момент вращения всей машины, умножив приведенный выше момент вращения на $2p$.

Обозначив, через $2a$ число параллельно соединенных ветвей обмотки, мы получим для тока в проводе одной ветви выражение $\frac{I}{2a}$. Для обмотки, бесконечно распределенной по окружности якоря, число витков, находящихся в малом центральном угле $d\alpha$, равно $\frac{w}{2\pi} \cdot d\alpha$.

Момент вращения всех витков, секционные стороны которых находятся в верхнем слое и принадлежат одному полюсному делению, будет равен согласно ур. (38):

$$\begin{aligned} D' &= \int_0^{\pi} \frac{1}{9,81} \cdot \frac{w}{2\pi} \cdot d\alpha \cdot \frac{d\Phi}{d\alpha} \cdot \frac{I}{2a} \cdot 10^{-8} \text{ кгм} = \\ &= \frac{1}{9,81} \cdot \frac{w}{2\pi} \cdot \frac{I}{2a} \int_{-\Phi_m}^{+\Phi_m} d\Phi \cdot 10^{-8} \text{ мкг} = \frac{1}{9,81} \cdot \frac{w}{\pi} \cdot \frac{I}{2a} \cdot \Phi_m \cdot 10^{-8} \text{ кгм} \end{aligned} \quad (39)$$

Момент вращения 2-полюсной машины, учитывая что $w = \frac{z}{2}$ (z — число проводов), выразится следующей формулой:

$$D = \frac{p}{a} \cdot \frac{z}{2\pi \cdot 9,81} \cdot I \cdot \Phi_m \cdot 10^{-8} \text{ кгм} \quad (40)$$

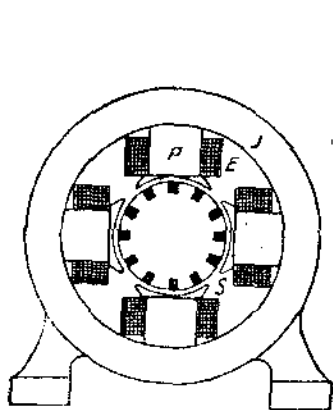
Эту зависимость можно получить и из ур. (14), если рассматривать силы, действующие на отдельные провода.

Полезный момент вращения (равный и противоположно направленный преодолеваемому моменту нагрузки) будет меньше подсчитанного выше момента вращения D на величину момента вращения, необходимого для холостого хода машины. Для создания в генераторе тока I необходимо приложить момент вращения больший, чем подсчитанный из ур. (40) на величину момента холостого хода.

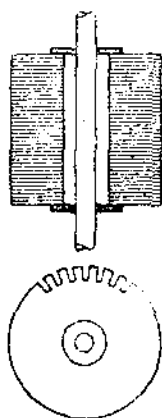
§ 4. Устройство машины постоянного тока.

В машинах постоянного тока часть, создающая поток (магнитная система), образует статор, тогда как индуцируемая обмотка укреплена на вращающемся роторе (якоре) машины. Такое распределение обусловлено главным образом конструктивным оформлением частей, служащих для коммутации. Так как щетки занимают относительно поля полюсов неподвижное положение, то, при неподвижном якоре и вращающейся магнитной системе, щетки должны были бы вращаться вместе с последней, что повело бы к неудобным конструкциям.

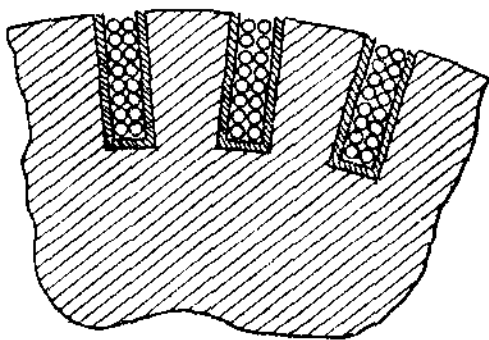
Магнитная система состоит из нескольких полюсов P , расположенных по окружности (фиг. 31) и имеющих обмотки возбуждения E . Через



Фиг. 31. Магнитный остов и якорь.



Фиг. 32. Якорь машины постоянного тока.



Фиг. 33. Пазы с обмоткой.

последние проходит постоянный ток для создания постоянного потока. Обмотки полюсов соединены между собою так, что северные полюсы чередуются с южными (стр. 18). Полюсы магнитно связаны между собою кольцеобразным ярмом J . На концах полюсы переходят в так называемые полюсные башмаки S . От формы, придаваемой последним, зависит распределение индукции по окружности якоря.

С целью уменьшения вихревых токов цилиндр якоря составляется из круглых железных листов с наклеенной на них бумажной изоляцией. На якоре монтируется индуцируемая обмотка машины. Для того чтобы обмотка не сдвигалась по окружности под действием касательных усилий, ее располагают в пазах, выштампованных в осевом направлении в листах (фиг. 32 и 33). Железные выступы между двумя соседними пазами носят название зубцов.

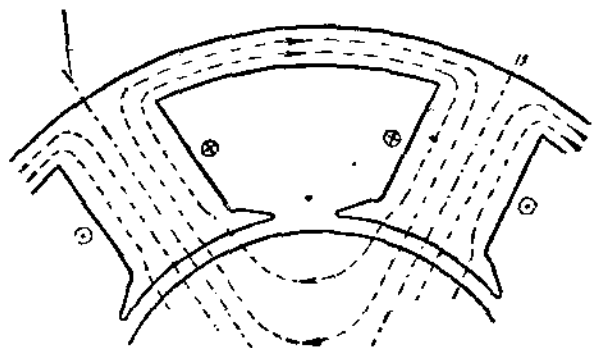
Обмотка якоря состоит из проводов, каждая пара которых образует виток. Несколько витков можно собрать в секцию, одна сторона которой будет находиться в нижнем слое одного паза, а другая сторона — в верхнем слое другого паза. Нравейшие машины имеют почти исключительно двухслойные обмотки.

От обмотки якоря идут ответвления к коллектору, насаженному на одном валу с якорем. Коллектор состоит из многих пластин, собранных в один цилиндр и изолированных друг от друга в радиальных плоскостях при помощи слюдяных прокладок.

По коллектору скользят угольные щетки, посредством которых ток отводится от обмотки или подводится к ней.

§ 5. Магнитная цепь.

Магнитный поток Φ в машине постоянного тока создается тогда, когда через витки обмотки возбуждения, насаженной на сердечник полюса, пропускается постоянный ток. Для заданного направления тока в обмотке возбуждения можно, пользуясь правилом пловца, предложенным Ампером, определить направление созданного потока. Как уже упомянуто, обмотки возбуждения соединяются так, чтобы в двух соседних полюсах создавались потоки противоположных направлений. Ампервитки двух соседних полюсов имеют, следовательно, одинаковое направление (фиг. 34).



Фиг. 34. Магнитная цепь.

Магнитный поток, стремясь найти путь с наименьшим сопротивлением, проходит через различные части машины. В полюсных башмаках, благодаря их большому сечению, поток расширяется и проходит затем через воздушный зазор в железо якоря.

Здесь поток подразделяется, при чем оба частичных потока пронизывают железо якоря в противоположных направлениях, после чего входят через воздушный зазор в оба соседних полюса. Точно таким же образом делится поток полюса и в ярме, так что в ярме и в якоре проходит в одном направлении лишь половина потока полюса. Частичные потоки можно мысленно отделить друг от друга радиальными плоскостями, проходящими через осевые линии полюсов. Индукционные линии этих частичных потоков образуют замкнутые кривые вокруг междуполюсного пространства, в котором находятся ампер-витки возбуждения. Величина частичного потока определяется магнитной проводимостью цепи и магнитодвижущей силой, заданной ампер-витками в междуполюсном пространстве. Для магнитной цепи мы получаем здесь формальную аналогию с законом Ома для электрической цепи¹⁾

$$\Phi = \text{МДС} \times \Lambda,$$

где МДС — магнитодвижущая сила, а Λ — магнитная проводимость. Существенная разница между этими обеими цепями, подчиняющимися аналогичным законам, заключается в том, что в магнитной цепи, в отличие

¹⁾ Auerbach, Handbuch d. Elektr. u. d. Magn. 4. 127 ff u. 378 f., Barth, Leipzig.

от цепи электрической, для поддержания поля никакой работы не расходуется.

Магнитодвижущая сила в магнитной цепи определяется из линейного интеграла напряжения магнитного поля¹⁾

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = 0,4 \cdot \pi \cdot I \cdot w \text{ эргов.} \quad (42)$$

Линейный интеграл магнитного напряжения по замкнутой цепи равен $0,4\pi$ -кратному числу ампер-витков.

Магнитодвижущую силу целесообразно выразить следующим образом:

$$\text{МДС} = \frac{\oint \vec{H} \cdot d\vec{l}}{0,4\pi} = I \cdot w, \quad (43)$$

что дает возможность измерять ее в амперах.

Для однородной магнитной цепи с постоянным поперечным сечением F мы имеем

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = H \cdot l \quad (44)$$

в случае, если за путь интегрирования взят путь одной индукционной линии.

Поток Φ можно представить как произведение индукции B на пронизываемую им площадь F :

$$\Phi = B \cdot F \quad (45)$$

Из ур. (41), (43), (44) и (45) определяется магнитная проводимость цепи

$$\Lambda = \frac{\Phi}{\text{МДС}} = \frac{B \cdot F}{I \cdot w} = \frac{0,4\pi B \cdot F}{H \cdot l} \quad (46)$$

Зависимость между индукцией B и напряженностью магнитного поля H выражается следующей формулой

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}, \quad (47)$$

где μ — магнитная проводимость материала, из которого состоит цепь.

Таким образом, магнитная проводимость равна

$$\Lambda = \frac{0,4\pi \mu \cdot H \cdot F}{H \cdot l} = \frac{0,4\pi \cdot \mu \cdot F}{l} \quad (48)$$

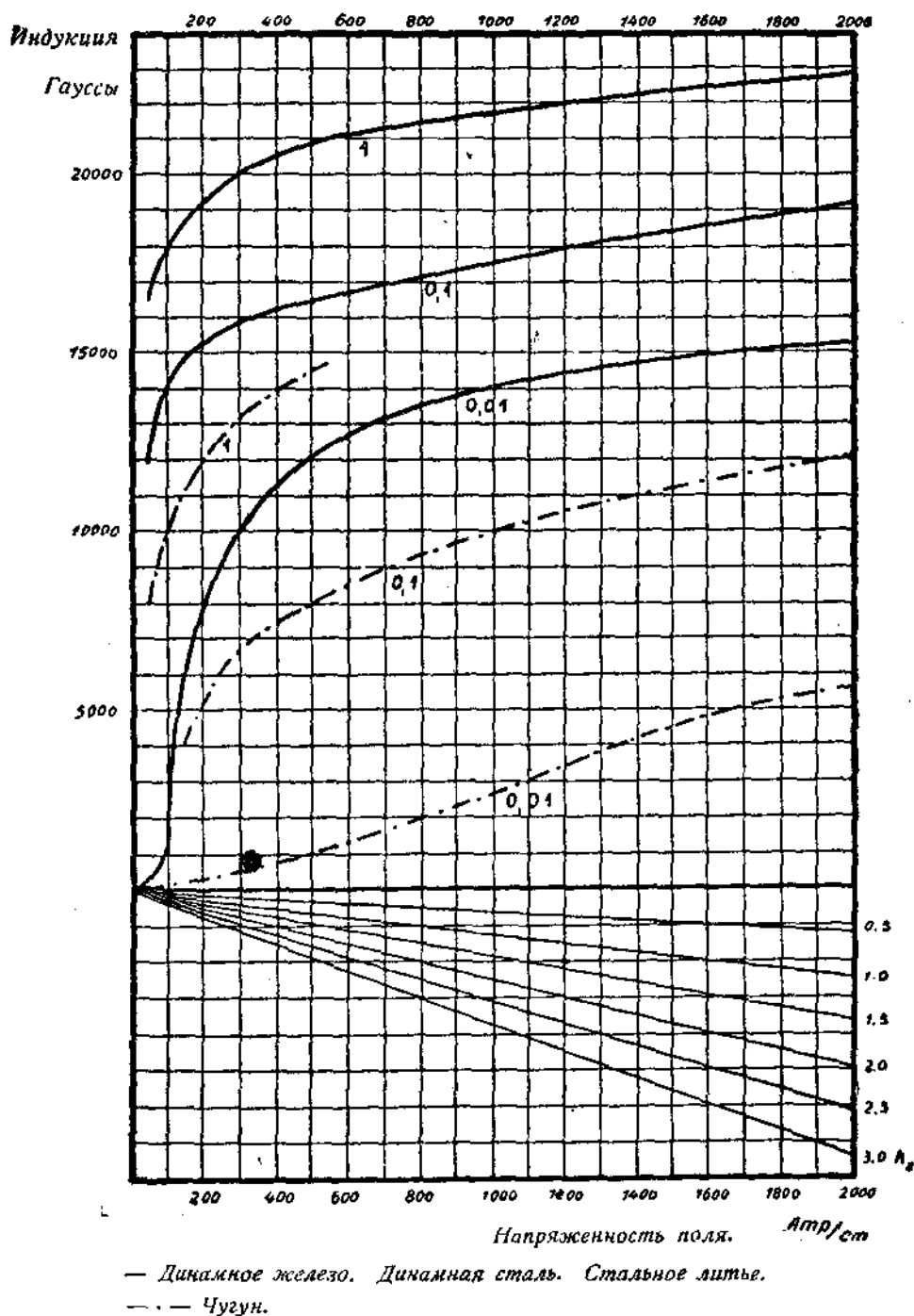
Обратной величиной является магнитное сопротивление. Зависимость этой величины от длины и поперечного сечения цепи такая же, как и у омического сопротивления, если под μ понимать удельную магнитную проводимость материала.

Магнитная проводимость μ не является постоянной величиной для материала, так как она зависит от напряженности магнитного поля. В технике пользуются, согласно ур. (47), так называемой кривой намагничивания (фиг. 35), которая дает зависимость индукции $\vec{B}$ непосредственно в функции от напряженности поля $\vec{H}$ (измеренного в ампер/см). Кривые намагничивания для различных материалов различны²⁾. Общий вид кривой намагничивания представлен на фиг. 36. В технике отличают три характерные области в кривой намагничивания:

1 — 2 — почти прямолинейную ненасыщенную часть, в которой $\vec{B}$ возрастает сильно и почти пропорционально величине $\vec{H}$;

¹⁾ J. Hopkinson. Original Papers. Vol. I: Dynamo-Electric Machinery. S. 84 ff. Cambridge: at university press 1901.

²⁾ Auerbach. Handbuch d. Elektr. u. d. Magn. 4. 711 ff, Barth, Leipzig.



Фиг. 35. Кривые намагничивания (по R. Richter Elektrische Maschinen. Springer. Berlin. 1924). Масштаб абсциссы действителен лишь для кривых, отмеченных 1, и для прямых ниже оси абсцисс; для кривых, обозначенных через 0,1 и 0,01, масштаб следует умножить на 0,1 или 0,01.

2—3—кривую часть (колени), в которой напряженность поля возрастает сильнее;

3 — насыщенную часть, в которой $\bar{B}$ возрастает снова почти пропорционально величине $\bar{H}$, но возрастание при этом происходит очень медленное.

Для воздуха мы имеем $\mu=1=\text{const}$, так что $\bar{B}=\bar{H}$, или $\bar{B}=0,4\pi\cdot\bar{H}$, если $\bar{H}$ измеряется в амп./см.

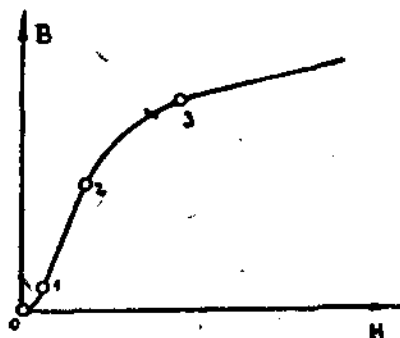
Если магнитная цепь состоит (как в электрических машинах) из нескольких частей с различной проводимостью и неодинаковыми поперечными сечениями, то определяют магнитное сопротивление отдельных частей и после этого находят общее сопротивление как сумму сопротивлений отдельных частей. Таким путем представляется возможным при заданном возбуждении определить магнитный поток в цепи.

В электротехнике, в особенности при предварительном расчете электрических машин, приходится в большинстве случаев решать обратную задачу. Для создания желательной ЭДС необходим определенный поток. Требуется определить возбуждение, которое в состоянии создать такой поток в магнитной цепи машины.

При этом целесообразно рассматривать отдельные части цепи, отличающиеся между собою в геометрическом и магнитном отношениях, а именно воздушный зазор (два раза), якорь, оба сердечника полюсов и ярмо. Для каждой из этих частей определяют среднюю индукцию $\bar{B}$ при заданном потоке и среднем поперечном сечении. Из кривой намагничивания находят затем напряженность поля $\bar{H}$ в амп./см для соответствующего материала. Произведение из $\bar{H}$ и средней длины l см в направлении $\bar{H}$ дает нам магнитное напряжение V в амперах, необходимое для проведения желательного потока Φ через соответствующую часть магнитной цепи. По отношению к потоку названные выше отдельные части цепи соединены последовательно. Таким образом, чтобы получить общее магнитное напряжение, а следовательно и потребные ампер-витки, необходимо сложить все частичные магнитные напряжения цепи. Полученные таким путем ампер-витки должны находиться в междуполюсном пространстве, при чем в магнитном отношении безразлично, будет ли большой ток проходить через малое число витков или, наоборот, меньший ток — через большое число витков. Наряду с потребным числом ампер-витков критерием для выбора обмотки возбуждения является также электрическое напряжение возбуждения и пространство, предоставленное для обмотки.

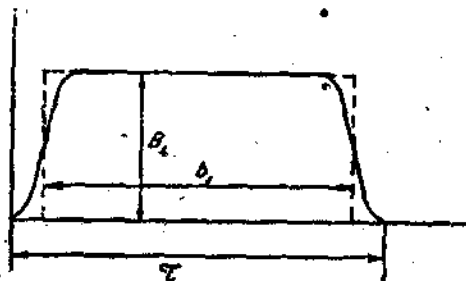
В дальнейшем будут подробнее рассмотрены отдельные части магнитной цепи.

В воздушном зазоре сосредоточена главная часть сопротивления магнитной цепи, так как магнитная проводимость μ у железа значительно больше, чем у воздуха ($\mu=1$). Поэтому, для получения возможно меньшего числа ампер-витков, в машинах постоянного тока устраивают возможно меньший воздушный зазор. Однако, предел в этом направлении кладется условиями механического выполнения, поверхностными потерями и реакцией якоря (см. ниже).

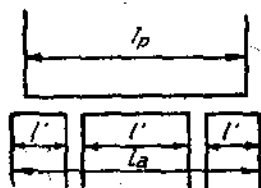


Фиг. 36. Кривая намагничивания.

Распределение индукции по окружности якоря получают при помощи осциллографа (у готовых машин) или графическим путем при помощи построения картины поля ¹⁾. Форма кривой магнитной индукции (фиг. 37) зависит, главным образом, от формы полюсных башмаков и от ширины полюсной дуги. Расчетной (теоретической) полюсной дугой b_t мы называем ширину прямоугольника, имеющего при той же максимальной индукции B_L ту же площадь, что и действительная кривая индукции.



Фиг. 37. Кривая индукции и расчетная теоретическая дуга.



Фиг. 38. Длина полюсного башмака и якоря.

Индукция распределена неравномерно и в осевом направлении, благодаря подразделению якоря на несколько пакетов для лучшего вентилирования (фиг. 38). Здесь мы также вводим понятие расчетной длины якоря l_a . Обозначив через $l_e = \Sigma l'$ длину железа якоря, а через l_p — осевую длину полюсного башмака, мы будем иметь:

$$l_e = \frac{l_p + l_a}{2} \quad (49)$$

Отсюда мы получаем расчетное значение поперечного сечения воздушного пути потока $l_e \cdot b_t$ и для заданного потока Φ определяем индукцию:

$$B_L = \frac{\Phi}{l_e \cdot b_t} \quad (50)$$

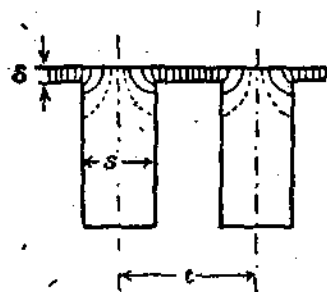
Согласно сказанному выше, напряженность поля в ампер/см выразится:

$$H_L = \frac{1}{0,4\pi} \cdot B_L \cong 0,8 B_L \quad (51)$$

Длина пути в направлении напряженности магнитного поля H_L соответствует ширине воздушного зазора δ под серединой полюса. Для гладкого якоря магнитное напряжение у воздушного зазора, следовательно, равно $H_L \cdot \delta$.

Однако, во всех новейших машинах якоря устраиваются с пазами, так как при этом удается получить меньший воздушный зазор и, кроме того, проводники надежнее и удобнее укрепляются на якоре.

В якоре с пазами магнитная проводимость в воздушном зазоре распределена не так равномерно, как в гладком якоре. Против зубца проводимость значительно больше, чем против паза. Поэтому поток над зубцами оказывается более густым, чем над пазами (фиг. 39). Над зубцами приходится иметь дело с большей индукцией $B_{\max}$ и соответственно с большим



Фиг. 39. Распределение индукции в якоре с пазами.

¹⁾ Ph. Lehmann. Graph. Methode zur Bestimmung des Kraftlinienverlaufs. Elektrot. Ztschr. 1909, S. 995—R. Richter. Das Feld in den Lufträumen elektr. Maschinen, Archiv f. Elektrotechnik 11, 85, 1922.

напряжением магнитного поля. Картер (F. W. Carter) учитывал увеличение магнитного напряжения в воздушном зазоре благодаря наличию пазов, введя сначала для этой цели коэффициент, подсчитанный им для открытых бесконечно глубоких пазов ¹⁾.

Легко убедиться, что неравномерность в распределении поля, а тем самым и коэффициент k_c будет тем больше, чем больше ширина паза. Большой воздушный зазор действует, напротив, выравнивающе.

Коэффициент Картера равен с очень хорошим приближением

$$k_c = \frac{t(5\delta + s)}{t(5\delta + s) - s^2}, \dots \dots \dots (52)$$

где t —пазовое деление (от середины одного паза до середины другого, δ —ширина воздушного зазора и s —ширина паза ²⁾).

Таким образом, магнитное напряжение в обоих воздушных зазорах будет равно

$$2V_L = 1,6k_c \cdot \delta \cdot B_L \text{ амп.}, \dots \dots \dots (53)$$

где δ следует принять в см.

В якоре, согласно сказанному выше, следует рассчитывать на половинный поток, так как суммарный поток разветвляется здесь на две части, пронизывающие якорь в противоположных направлениях.

Рассмотрим сначала часть якоря, не имеющую пазов, так как зубцы из-за малого сечения железа обладают значительно большей индукцией.

Поток $\frac{\Phi}{2}$ пронизывает якорь, главным образом, по направлениям, параллельным окружности якоря. При этом, благодаря различному магнитному сопротивлению, поток не распределяется равномерно по сечению ³⁾. Однако, если отношение $\frac{h_A}{\tau}$ высоты якоря в радиальном направлении (фиг. 40) к полюсному делению не велико (приблизительно $\geq 0,4$), как это часто бывает на практике, то различие в распределении потоков незначительно и можно рассчитывать по средней индукции B_A .

Для уменьшения потерь от вихревых токов, (см. ниже) железо якоря подразделяется на тончайшие слои в направлении, перпендикулярном к оси. Для этой цели якорь собирается из железных листов толщиной в 0,5 мм, оклеенных с одной стороны тонкой шелковистой бумагой, или же покрытых слоем лака. Поэтому при подсчете индукции в якоре нельзя принимать полное сечение якоря в качестве сечения его железа. Уменьшение сечения железа бумажной прокладкой или лакировкой учитывается введением коэффициента заполнения железа k_E , принимаемого равным $k_E = 0,9$, при толщине листов в 0,5 мм. Таким образом, индукция в железе якоря равна

$$B_A' = \frac{\Phi/2}{0,9 \cdot l_g \cdot h_A} = \frac{\Phi}{1,8 \cdot l_g \cdot h_A} \dots \dots \dots (54)$$

По кривой намагничивания динамного железа мы получаем напряженность поля H_A (в амп./см), соответствующую этой индукции.

¹⁾ F. W. Carter. Luftspaltinduktion. The Electrical World and Engineer 38, 884, 1901.

²⁾ R. Gans. Der magnetische Widerstand eines gezahnten Ankers. Archiv f. Elektrotechnik 9, 231, 1921.—F. W. Carter. Induktion im Luftspalt und in der Polücke. Journal of the Institution of Electr. Engineers 29. 925. 1900.—R. Richter, Elektrische Maschinen. Springer, Berlin 1924, стр. 178.—J. Sumec. Elektrotechnik und Maschinenbau 1921, стр. 357.

³⁾ R. Rüdénberg. Über die Induktionsverteilung und Verlustberechnung. Elektrot. Ztschr. 1906, стр. 109.—W. M. Thornton. Verteilung der Induktion im Anker. Electrician 56, 959, 1906.

Средний путь L_A для сил поля представлен на фиг. 40. Так как он не поддается простому подсчету, то его принимают приблизительно равным пути по окружности якоря. Этот путь равен

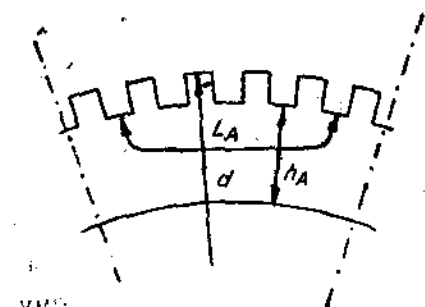
$$L_A = \frac{\pi d}{2p} \text{ см}, \dots \dots \dots (55)$$

где d — диаметр якоря и $2p$ — число полюсов.

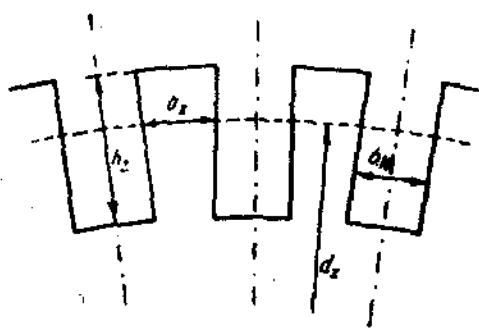
Магнитное напряжение в якоре будет, следовательно, равно

$$V_A = L_A \cdot H_A \text{ амп.} \dots \dots \dots (56)$$

Доля величины V_A в магнитном напряжении всей цепи незначительна, так что некоторая неточность в подсчете длины среднего пути не даст большой ошибки.



Фиг. 40. Средняя длина пути потока в якоре.



Фиг. 41. Зубцы якоря.

Зубцы якоря пронизываются потоком в радиальном направлении. Благодаря значительно большей проводимости железа в сравнении с воздухом почти весь поток будет проходить через зубцы.

Пренебрегая совершенно магнитной проводимостью воздуха, мы должны считать, что поток, проходящий через пазовое деление t :

$$\Phi_z' = B_L \cdot l_z \cdot t \dots \dots \dots (57)$$

целиком проводится железом зубца.

Если обозначить через b_z ширину зубца на высоте, соответствующей диаметру d_z , то поперечное сечение железа в этом месте будет

$$Q_z = k_E \cdot l_z \cdot b_z \dots \dots \dots (58)$$

где k_E — коэффициент заполнения железа (см. выше). Ширина паза b_N в большинстве машин является величиной постоянной, тогда как ширина зубца b_z изменяется с изменением диаметра окружности d_z (фиг. 41). Для N пазов мы имеем:

$$t = \frac{\pi d}{N} \dots \dots \dots (59)$$

$$b_z = \frac{\pi \cdot d_z - b_N \cdot N}{N} \dots \dots \dots (60)$$

Из последних ур. (57) до (60) получается, следовательно, величина кажущейся индукции в зубцах:

$$B_z' = \frac{\Phi_z'}{Q_z} = \frac{B_L \cdot l_z \cdot t}{k_E \cdot l_z \cdot b_z} = B_L \cdot \frac{\pi d}{\pi d_z - b_N \cdot N} \cdot B_L \dots \dots \dots (61)$$

В действительности же путь через воздух паза также обладает некоторой, хотя и незначительной магнитной проводимостью, соединенной параллельно с проводимостью железа зубца. Благодаря наличию этого пути через воздух общая проводимость увеличивается, а тем самым уменьшается магнитное напряжение в зубцах якоря. Проводимость воздушного пути в пазу проявляется тем больше, чем больше насыщение железа зубцов, так как удельная проводимость μ железа при высоких индукциях сильно уменьшается и близится к числам порядка $\mu=1$, т.е. к коэффициенту магнитной проницаемости воздуха. В практических случаях, при индукциях в зубцах больших, чем 17000 гауссов, рекомендуется не пренебрегать параллельным воздушным путем в пазу (а также и между листами).

В действительности воздушный лоток распределяется в зубцовом делении пропорционально магнитным проводимостям поперечных сечений зубца и паза:

$$\Phi_Z' = \Phi_Z + \Phi_N \dots (62)$$

Введя коэффициент:

$$k_z = \frac{Q_N}{Q_Z}, \dots (63)$$

дающий отношение между поперечными сечениями воздуха и зубцов, мы получим после деления ур. (62) на Q_Z :

$$B_Z' = B_Z + k_z \cdot B_N \dots (64)$$

откуда можно определить действительную индукцию в зубцах

$$B_Z = B_Z' - k_z \cdot B_N \dots (65)$$

Здесь B_N — индукция в воздушном пути; отсюда, согласно указанному в начале параграфа, мы получаем:

$$B_N = 0,4\pi \cdot H_N \dots (66)$$

Ур. (65), следовательно, превратится в:

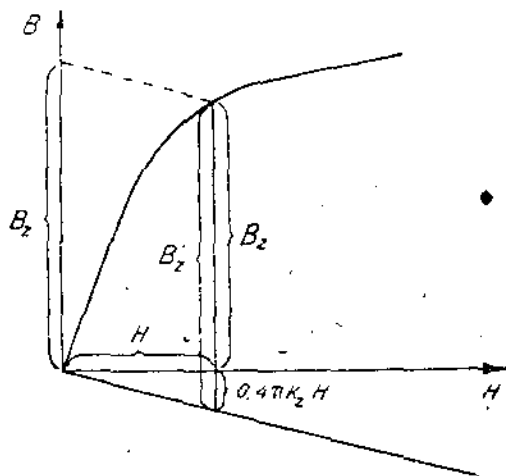
$$B_Z = B_Z' - 0,4\pi \cdot k_z \cdot H_N \dots (67)$$

Вычитаемое в правой части ур. (67) можно нанести в функции от H и отложить вниз непосредственно под кривой намагничивания соответствующей железной части (фиг. 35 и 42). Если ордината от этой прямой до кривой намагничивания будет равна кажущейся индукции в зубцах B_Z' , то отрезок ординаты от оси абсцисс до кривой в соответствующем месте даст нам действительную индукцию в зубцах. Соответствующую напряженность поля можно отсчитывать по оси абсцисс¹⁾. Отсюда ясно видно, что уменьшение магнитного напряжения в зубцах якоря благодаря наличию параллельного пути через воздух будет тем значительнее, чем больше k_z и чем выше B_Z' .

Коэффициент k_z можно определить из следующего уравнения [ур. (58), (59), (60)]:

$$k_z = \frac{Q_N}{Q_Z} = \frac{l_Z - k_E \cdot b_Z}{k_E \cdot b_Z} = \frac{\pi \cdot d_Z}{k_E (\pi d_Z - b_N \cdot N)} - 1 \dots (68)$$

Так как поперечное сечение зубца изменяется в зависимости от его высоты, то и индукция, а тем самым и напряженность поля в различных



Фиг. 42. Кажущаяся и действительная индукция в зубце.

¹⁾ R. Richter. Elektrische Maschinen 1, 188, Springer, 1924.

местах зубца будут различны. Необходимо, следовательно, напряженность поля в зубце определить в функции от высоты зубца, после чего можно путем интегрирования найти магнитное напряжение в зубцах якоря:

$$V_z = \int_0^{h_z} H_z \cdot dh \dots \dots \dots (69)$$

Для практических целей достаточно приближенного интегрирования по правилу Симпсона. Согласно этому правилу высоту зубца делят на $2n$ одинаковых частей и определяют напряженность поля в конечных и в промежуточных точках:

$$H_{z0}, H_{z1}, H_{z2}, \dots, H_{z2n-2}, H_{z2n-1}, H_{z2n}.$$

Отсюда получается средняя напряженность поля:

$$H_z^m = \frac{1}{6n} (H_{z0} + 4H_{z1} + 2H_{z2} + \dots + 2H_{z2n-2} + 4H_{z2n-1} + H_{z2n}) \dots \dots (70)$$

В большинстве практических случаев получаются достаточно точные результаты при определении напряженности поля для такого места зубца, которое удалено на $\frac{1}{3}$ высоты зубца от его наиболее узкого места. Эта напряженность поля и вводится в расчет в качестве средней напряженности H_z^m ¹⁾. Таким образом магнитное напряжение в зубцах будет равно

$$V_z = h_z \cdot H_z^m \dots \dots \dots (71)$$

При подсчете ампер-витков цепи следует повторить напряжение V_z два раза, так как поток дважды проходит путь через зубцы якоря.

Не все индукционные линии, создаваемые катушками возбуждения полюсов, проникают в якорь и сопряжены с витками обмотки якоря. Часть потока проходит через междуполюсное пространство и через воздушный промежуток между лобовыми поверхностями полюсов и подшипниковыми щитами к соседнему полюсу, к ядру или к подшипниковому щиту, после чего замыкается через железо. Этот поток, в отличие от полезного потока, сопряженного с обмоткой якоря, называют потоком рассеяния Φ_s машины. Он составляет около 10—20% от полезного потока. Величину потока рассеяния можно определить графически из кривых поля²⁾ или расчетным путем из геометрических размеров машины³⁾. В обоих случаях требуется определить магнитную проводимость пути рассеяния. Так как путь рассеяния в отношении потока представляет собою цепь, параллельную полезному пути, то здесь мы будем иметь дело с одинаковыми магнитными напряжениями:

$$V_s = 2V_L + 2V_z + V_d \dots \dots \dots (72)$$

Тогда поток рассеяния выразится:

$$\Phi_s = V_s \cdot \Lambda_s \dots \dots \dots (73)$$

где Λ_s — магнитная проводимость пути рассеяния.

Через поперечное сечение сердечника полюса проходит весь полезный поток Φ и большая часть потока рассеяния Φ_s ; небольшая часть потока рассеяния покидает полюс уже у его стенок, не проходя по всей длине полюсного сердечника. Однако, так как поток рассеяния может

¹⁾ K. Pichelmayer. *Dynamobau*. S. 140. Hirzel, Leipzig, 1908.

²⁾ R. Richter. Das Feld in den Lufträumen elektrischer Maschinen. *Archiv f. Elektrotechnik* 11, 85, 1922.

³⁾ Arnold-la Cour. *Die Gleichstrommaschine* 1, 148 ff. Springer, Berlin, 1919.

быть определен из размеров машины лишь приблизительно, то для запаса принимают, что общий поток рассеяния проходит по всей длине полюса. Поток в магнитных полюсах, следовательно, равен

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_s \dots \dots \dots (74)$$

Индукция в магнитном сердечнике будет равна:

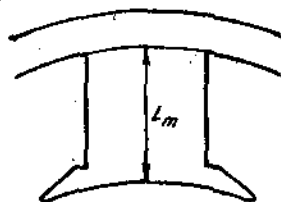
$$B_m = \frac{\Phi_m}{Q_m} \dots \dots \dots (75)$$

Так как поток в полюсе — величина постоянная, то сердечник последнего может быть изготовлен из массивного железа (стального литья). В полюсных башмаках при наличии якоря с пазами (фиг. 39) возникают однако колебания потока благодаря неравномерному распределению магнитной проводимости в воздушном зазоре. При вращении якоря, на поверхности полюсных башмаков будут возникать вихревые токи, благодаря изменению потока. Для уменьшения вихревых токов полюсные башмаки изготавливаются большей частью из железных листов. Из конструктивных соображений часто собирают из листов весь полюс в целом. В этом случае при расчете поперечного сечения сердечника полюса следует учитывать коэффициент заполнения k_z (см. выше).

По кривой намагничивания, соответствующей материалу полюсного сердечника, мы получаем напряженность поля H_m амп./см.

За длину пути L_m в полюсах магнитов (фиг. 43) принимают суммарную длину от основания полюса до поверхности полюсного башмака. Магнитное напряжение у обоих полюсов равно тогда

$$2V_m = 2L_m \cdot H_m \dots \dots \dots (76)$$



Фиг. 43. Длина пути потока в магнитном полюсе.

Поток в ярме составляет, как указано выше, лишь $\frac{\Phi_m}{2}$, т.е. половину потока в полюсе. Из соображений механической жесткости поперечное сечение ярма большей частью выбирается настолько большим, что индукция в нем оказывается незначительной; невелико следовательно и магнитное напряжение ярма. В новейших машинах в качестве материала для ярма применяют большей частью стальное литье (реже чугун). Мы имеем:

$$B_j = \frac{\Phi_m}{2Q_m} \dots \dots \dots (77)$$

За длину пути L_j принимают на практике, как и в случае якоря, величину дуги одного полюсного деления, измеренную по наружному диаметру ярма:

$$L_j = \frac{\pi \cdot D_j^a}{2p} \dots \dots \dots (78)$$

Величина H_j берется из кривой намагничивания в зависимости от материала и индукции (ур. 77). Таким образом, магнитное напряжение ярма равно

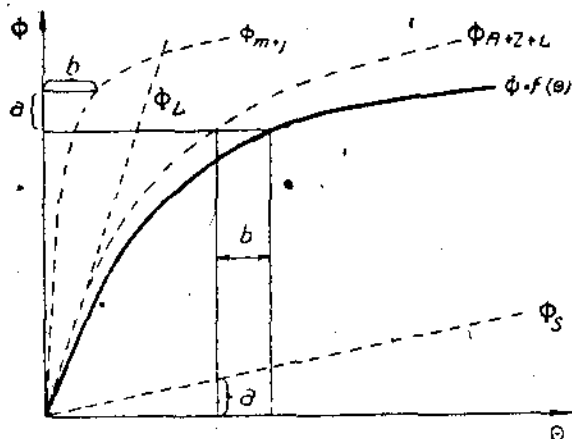
$$V_j = L_j \cdot H_j \dots \dots \dots (79)$$

Сложив все найденные магнитные напряжения отдельных частей рассматриваемой магнитной цепи, мы получим величину ампер-витков, необходимых для создания необходимого потока в магнитной цепи:

$$\Theta = \Sigma V = 2V_L + 2V_z + V_A + 2V_m + V_j \text{ амп.} \dots \dots \dots (80)$$

Если определить таким же образом ампер-витки для других значений потоков и нанести поток в функции от потребных ампер-витков, то мы получим (фиг. 44) магнитную характеристику машины.

При неизменном числе оборотов машины, вращающейся вхолостую, магнитный поток Φ будет пропорционален ЭДС, индуктированной в обмотке якоря, так что масштаб ординат можно выразить и в вольтах. При заданном числе витков возбуждения на один полюс можно на оси абсцисс наносить непосредственно ток возбуждения i , в амперах вместо пропорциональной ему величины ампер-витков. У машины, работающей вхолостую, можно снять опытным путем магнитную характеристику $E=f(i)$; последняя носит поэтому также название характеристики холостого хода машины.



Фиг. 44. Магнитная характеристика.



Фиг. 45. Насыщение железа путем вырезов в поперечном сечении.

Характеристика холостого хода дает представление об использовании машины и ее работе в магнитном отношении.

Прямолинейное протекание нитей части характеристики обуславливается главным образом магнитным напряжением у воздушного зазора, возрастающем пропорционально величине Φ .

Искривление характеристики вызывается насыщением железа. Отсюда по характеру искривления можно судить об использовании железа в машине. С другой стороны, путем соответствующего выбора индукций в железе можно вызвать искривление в желательном месте характеристики. Если желательно, чтобы искривление начиналось при небольших токах возбуждения (как, например, в возбуждательных машинах с целью получения устойчивой шунтовой регулировки в широких пределах), то в полюсах предусматривают прорезы (фиг. 45), заменяющие часть поперечного сечения воздухом; оставшаяся часть сечения железа будет при этом сильно насыщаться даже при малых индукциях¹⁾. Высокое насыщение железа можно перенести в зубцы или в якорь. Этого однако по возможности избегают, так как благодаря перемагничиванию и переменной индукции потери в железе при насыщении здесь возрастают.

При предварительном расчете целесообразно построить отдельные кривые для отдельных частей магнитной цепи, а именно:

1. $\Phi_{L+z+A} = f(2 V_L + 2 V_z + V_A)$,
2. $\Phi_{m+j} = f(2 V_m + V_j)$,
3. $\Phi_i = f(i)$.

¹⁾ Fr. Leyser, Stabile Erregermaschinen für weiten Regelbereich. Siemens-Zeitschrift, 4. 191. 1926.

Из этих кривых (фиг. 44) характеристика холостого хода определяется следующим образом:

Из кривой 1 для потока Φ находят магнитное напряжение в воздухе, зубцах и якоре. Такое же напряжение определяет величину потока рассеяния Φ_a ; для той же абсциссы мы имеем, следовательно, $\Phi_a = a$ (из кривой 3, фиг. 44).

Этот поток рассеяния складывают с полезным потоком и из кривой 2 определяют магнитное напряжение b у полюсов и ярма для суммарного потока. Прибавив величину b к кривой 1 в соответствующем месте, мы получим точку характеристики холостого хода.

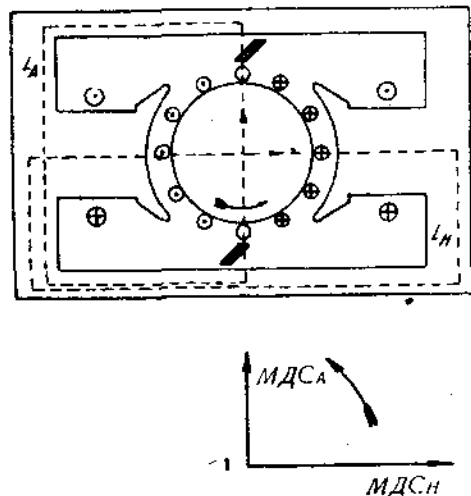
Таким же путем можно определить и другие точки характеристики холостого хода.

§ 6. Реакция якоря.

Все вышеприведенные рассуждения относились к машине, работающей вхолостую. Предполагалось, что в обмотке якоря ток отсутствует, благодаря чему все магнитные явления в машине сводятся к ампер-виткам в обмотке полюсов. Ток, проходящий через обмотку якоря, создает со своей стороны некоторое поле. Это поле якоря вызывает в распределении главного поля машины различные изменения, которые носят общее название реакции якоря.

На фиг. 46 представлены ампер-витки якоря и полюсов для заданного направления вращения генератора. Обмотку якоря можно рассматривать как катушку, ось которой совпадает с линией, соединяющей обе щетки. Таким образом, ось катушек возбуждения главного поля перпендикулярна к оси поля якоря. Соответственно этому перпендикулярны друг другу и магнитодвижущие силы обеих катушек благодаря чему эти МДС не могут действовать друг на друга непосредственно. На фиг. 46 показаны средние пути L_H и L_A обеих магнитодвижущих сил; замкнутый путь L_H охватывает в качестве действующих ампер-витков только ампер-витки полюсов, так как внутри пути L_H ампер-витки якоря равны и противоположны друг другу, а потому взаимно уравниваются. Точно также бездействуют в магнитном отношении ампер-витки полюсов по направлению к охватывающему их пути L_A .

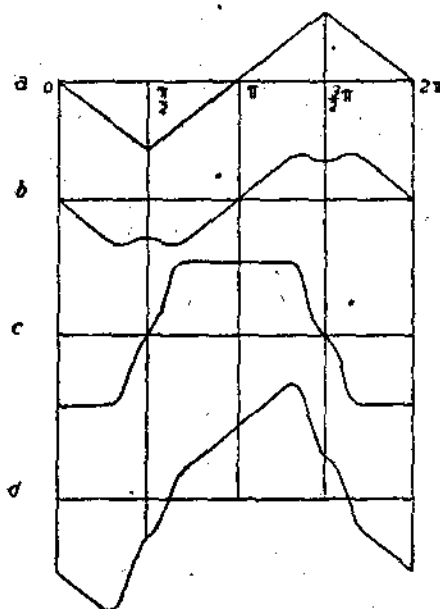
Следует ожидать, что наложение обеих МДС даст результирующую МДС, имеющую приблизительно направление геометрической суммы (о действительном геометрическом сложении здесь однако не может быть речи, так как распределение обеих МДС на окружности якоря различно). Действительно при прохождении тока через якорь среднее направление поля также поворачивается несколько в направлении МДС якоря, или, иначе говоря, магнитная нейтральная зона (которую мы мыслим себе перпендикулярной к среднему направлению магнитного поля машины) сдвигается на соответствующую величину по окружности якоря.



Фиг. 46. МДС якоря и полюсов.

Магнитодвижущая сила токов якоря будет максимальной в магнитной оси обмотки, т.е. против междупольного пространства. Перпендикулярно к этой оси, т.е. под серединой полюсных башмаков, МДС будет равна нулю. При равномерном распределении ампер-витков по окружности якоря МДС прямолинейно возрастает от середины полюсов к междупольному пространству (фиг. 47 а). Кривую распределения результирующей МДС по окружности якоря называют кривой поля возбуждения.

Магнитное сопротивление в междупольном пространстве очень велико в сравнении с сопротивлением в воздушном зазоре под полюсами. По пути L_1 на фиг. 46 будет проходить, следовательно, лишь небольшой поток; индукция в междупольном пространстве поэтому мала. Под полюсами машины магнитная проводимость



Фиг. 47. Наложение кривых главного поля и поля якоря.

больше и почти постоянна; индукция поля якоря будет поэтому пропорциональна МДС и к тому же у концов полюсных башмаков больше, чем по середине полюса. На фиг. 47 б представлена кривая поля (распределение индукции по окружности якоря) обмотки якоря. Эту кривую поля можно найти опытным путем; она была впервые определена Томпсоном (S. P. T. Thompson)¹⁾.

Кривая поля обмотки полюсов известна уже из фиг. 37 и представлена еще раз на фиг. 47 в в положении, соответствующем кривой поля якоря. Путем наложения обеих кривых поля б и в мы получаем результирующую кривую поля при токнесущем якоре (фиг. 47 д). На деле эта кривая бывает несколько более плоской, так как благодаря насыщению в зубцах возрастает магнитное сопротивление для вершины кривой поля и поток переходит в этой части с меньшей индукцией. Изменение распределения поля благодаря ампер-виткам якоря называют искажением поля.

В машинах постоянного тока искажение поля вызывает следующие нежелательные явления:

1. Благодаря острой вершине искаженной кривой поля в обмотке якоря в соответствующем месте индуктируются высокие напряжения в отдельных витках, что при известных условиях может вызвать перекрытие дуги на коллекторе (круговой огонь).

2. Магнитная нейтральная зона сдвигается по окружности якоря. Если, следовательно, щетки расположены в геометрически нейтральной зоне, то секция, замкнутая накоротко щетками, не будет находиться в зоне, лишённой поля, благодаря чему в коротко-замкнутой секции будут индуктироваться ЭДС, способствующие появлению огня под щетками.

3. Потери от вихревых токов в зубцах возрастают приблизительно пропорционально квадрату максимального значения индукции.

4. Так как благодаря насыщению в железе возрастание индукции на одной стороне кривой поля меньше, чем уменьшение индукции на другой

¹⁾ G. Kapp. Dynamomaschinen für Gleich- und Wechselstrom Springer, Berlin, 1904. S. 244.

стороне, то суммарный поток, а тем самым и индуцированная ЭДС, будут поэтому при нагруженном якоре меньше, чем при холостом ходе.

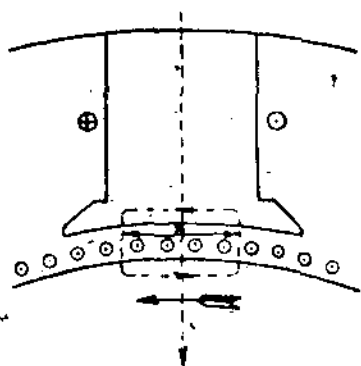
Попытаемся заняться количественным определением падения напряжения из-за искажения поля (поперечное поле). На фиг. 48 представлены продольный поток полюсов и налагающийся на него поперечный поток обмотки якоря под полюсным башмаком. Здесь ясно видно, каким образом в одной половине полюсного башмака магнитный поток усиливается поперечным полем, а в другой половине — им ослабляется. Величина этого влияния поперечного поля может быть определена, зная ампер-витки якоря, сопряженные с определенной индукционной линией и действующие как МДС, а также величину магнитного сопротивления соответствующего пути.

Если представить себе ампер-витки якоря равномерно распределенными по его окружности, то объем тока A на один погонный сантиметр окружности равен

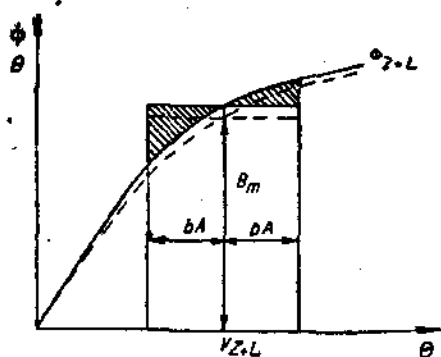
$$A = \frac{I \cdot z}{2a \cdot \pi \cdot d} \text{ ампер/см, } \dots (81) \quad \text{Фиг. 48. Поперечный поток якоря.}$$

где I — ток в ампер, $2a$ — число параллельных ветвей обмотки якоря, z — число проводников и d — диаметр якоря в см.

Таким образом, обозначив через x расстояние между местом входа индукционной линии в якорь и местом ее выхода из него (расстояние измерено по окружности якоря), мы получим ампер-витки якоря, сопряженные с одной индукционной линией поперечного поля, равными $A \cdot x$ (фиг. 49).



Фиг. 49. Индукционная линия поперечного поля якоря.



Фиг. 50. Средняя индукция в воздушном зазоре при нагрузке.

Магнитное сопротивление пути индукционной линии сосредоточено, главным образом, в воздухе и в зубцах (двукратная величина) и уже найдено для характеристики холостого хода.

Наноса, согласно ур. (53) и (71), магнитный поток в функции от магнитного напряжения в воздухе и зубцах, мы получим фиг. 50. Вместо того, чтобы измерять ординаты в единицах потока Φ можно измерять их и в единицах индукции воздушного зазора B , пропорциональной потоку Φ . На фиг. 50 нанесена индукция в воздухе B при холостом ходе машины. При прохождении тока в якоре эта индукция останется неизменной по середине полюсного башмака (см. также фиг. 47). Против концов

полюсных башмаков индукция в воздухе при прохождении тока в якоре будет изменяться так, как показано выше. Для определения индукции в воздухе для какого-либо места полюсного башмака необходимо магнитное напряжение главного поля для воздуха и зубцов увеличить или уменьшить на такую величину ампер-витков якоря, какая в данном месте сопряжена с индукционной линией поперечного поля якоря. Для этого результирующего магнитного напряжения (ампер-витков) соответствующая индукция в воздухе получается из фиг. 50.

Пусть в каком-нибудь месте полюсного башмака (фиг. 49), удаленном от середины полюса на расстоянии $\frac{x}{2}$, проходит индукционная линия поперечного поля. Пусть магнитное напряжение главного поля для воздуха и железа равно V_{z+l} . Ампер-витки якоря, сопряженные с этой индукционной линией поперечного поля, составляют

$$\Theta_a = x \cdot A, \dots \dots \dots (82)$$

где объем тока A определяется из ур. (81). После этого из кривой фиг. 50 находят индукцию в воздухе

$$\Theta = V_{z+l} \pm x \cdot A \dots \dots \dots (83)$$

Если b — ширина полюсного башмака в см, то таким же путем находят значения индукции в воздухе на концах полюсных башмаков:

$$\Theta = V_{z+l} \pm b \cdot A \dots \dots \dots (84)$$

На фиг. 50 нанесены соответствующие ординаты. Отрезок кривой между этими ординатами дает распределение индукции под полюсным башмаком при наличии тока в якоре, при чем предполагается постоянный по величине воздушный зазор.

Из заштрихованных треугольников, ясно, что возрастание потока в одной половине полюсного башмака благодаря насыщению меньше, чем уменьшение потока в другой половине башмака.

Средняя индукция B_m в воздушном зазоре при нагрузке (средняя ордината отрезка кривой) таким образом меньше, чем индукция B при холостом ходе. Вследствие искажения поля при нагрузке, для получения таких же средних индукций (а следовательно и таких же потоков и таких же индуцированных ЭДС), как и при холостом ходе, необходимо увеличить возбуждение главного поля.

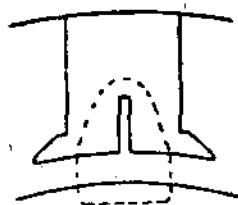
Если рассуждать таким же образом для нескольких индукций B и соединить полученные значения B_m при помощи кривой, то последняя будет представлять среднюю индукцию в воздухе при нагрузке в функции от магнитного напряжения главного потока в воздухе и зубцах. Разность абсцисс кривых B_m и B дает для каждой индукции величину необходимых благодаря искажению поля добавочных ампер-витков для воздуха и зубцов.

Так как искажение поля не оказывает заметного влияния на распределение потока в остальных частях магнитной цепи, то для получения кривой средней индукции в функции от тока возбуждения при нагрузке достаточно найденные выше добавочные ампер-витки прибавить к характеристике холостого хода.

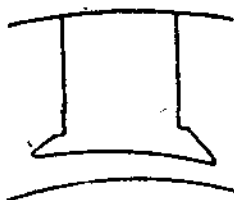
Для того, чтобы по возможности уменьшить вредное действие искажения поля, новейшие машины рассчитываются на большой главный магнитный поток и относительно небольшой объем тока. Здесь благоприятно действует также и увеличение воздушного зазора, так как этим самым увеличивается V_{z+l} в сравнении с bA .

Ширину полюсных башмаков не следует выбирать чересчур большой (около $b=0,6 \div 0,75 \tau$). Высокая индукция в железе полюсов действует выравнивающее на распределение потока, так как большая индукция встречает большее магнитное сопротивление; благодаря этому при высоких насыщениях в железе полюсов поперечный поток оказывается относительно слабым.

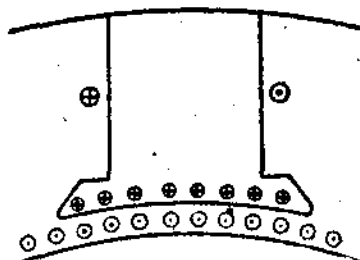
Устройством воздушных прорезов в полюсах в направлении главного потока можно искусственно увеличить магнитное сопротивление для поперечного потока (фиг. 51). При помощи воздушного зазора, переменного по окружности якоря (фиг. 52), можно достигнуть того, что индукция при холостом ходе будет, правда, распределена неравномерно, но зато при нагрузке окажется почти равномерно распределенной¹⁾. Наилучшим средством против искажения поля, действительным для всех условий нагрузки, является компенсационная обмотка.



Фиг. 51. Вырез в полюсе для уменьшения поперечного потока.



Фиг. 52. Переменный воздушный зазор под полюсным башмаком.



Фиг. 53. Компенсационная обмотка.

Здесь ампер-витки якоря, создающие поперечное поле, уравновешиваются равными и противоположно направленными ампер-витками полюсных башмаков (компенсационная обмотка) (фиг. 53). Компенсационную обмотку соединяют последовательно с обмоткой якоря, так что через обе эти обмотки проходит один и тот же ток. Благодаря этому ампер-витки якоря компенсируются в любой момент (также и при изменении нагрузок) равными им ампер-витками полюсных башмаков.

При помощи компенсационной обмотки оказывается возможным, в пределах полюсного башмака компенсировать поле якоря (с точностью до незначительных остаточных полей рассеяния между зубцами) и избежать таким путем искажения поля и всех связанных с ним недостатков (высокое напряжение между пластинами, увеличенные потери в железе зубцов, падение напряжения; см. выше). В междуполюсном пространстве поле якоря продолжает действовать (даже при наличии компенсационной обмотки) и вызывает сдвиг магнитной нейтральной зоны.

Определим теперь направление, в котором нейтральная зона сдвигается по окружности якоря при нагрузке.

Направления МДС обмотки якоря и полюсов перпендикулярны друг другу, как уже указано выше (см. начало параграфа). Последнее действительно как для генератора, так и для двигателя.

Если взять одинаковые ампер-витки в якоря и полюсах для генератора и двигателя, то для них будет действительна одна и та же векторная диаграмма. Разница будет заключаться только в направлении вращения. Как уже доказано (см. § 1), при одинаковых ампер-витках якоря и

¹⁾ M. Schenkel. Elektrotechnik Z. 67. J. J. Weber, Leipzig, 1924.

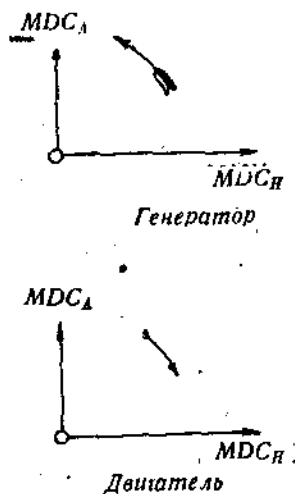
полюсов направление вращения у двигателя будет противоположно направлению вращения у генератора (фиг. 54).

Зависимость между магнитодвижущими силами и направлением вращения у генератора и двигателя можно охарактеризовать следующим образом.

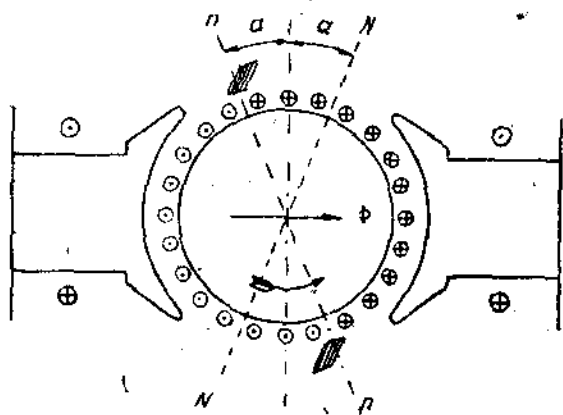
У генератора сила, приложенная к якорю, стремится отдалить МДС поля якоря от МДС главного поля, следовательно увеличить угол между ними.

У двигателя пондеромоторная сила стремится сблизить МДС поля якоря с МДС главного поля, следовательно, уменьшить угол между ними.

При нагруженном якоре магнитная нейтральная зона сдвигается по направлению МДС главного поля против МДС поля якоря (см. выше), следовательно, при генераторе нейтральная зона сдвинется по на-



Фиг. 54. МДС и направление вращения.



Фиг. 55. Противодействующее поле при сдвиге щеток.

правлению вращения, а при двигателе — против направления вращения. Для того чтобы избежать искрения под щетками, их следует сдвигать в зону, лишенную поля. Это средство часто применялось раньше. Однако, так как положение зоны, лишенной поля, меняется на окружности якоря с изменением нагрузки (следовательно, величины поля якоря), то в эксплуатации потребовалась бы очень частая регулировка щеток. Кроме того, имеется еще один недостаток. Если при нагрузке сдвинуть щетки в зону, лишенную поля (например при генераторе — по направлению вращения [фиг. 55]), то ампер-витки якоря при этом разделяются на четыре, части двумя плоскостями. Одна плоскость mn приходит через ось щеток, а другая плоскость NN симметрична первой относительно оси, перпендикулярной к оси полюсов. Каждая пара противоположных отрезков катушки по окружности образует обмотку. Оси полученных таким путем обмоток здесь перпендикулярны между собою. Обмотка внутри угла, равного 2α , создает поле, направленное прямо противоположно главному полю и ослабляющее последнее (продольное или противодействующее поле). Другая обмотка создает исключительно поперечный поток, проявляющийся в виде искажения поля под полюсными башмаками.

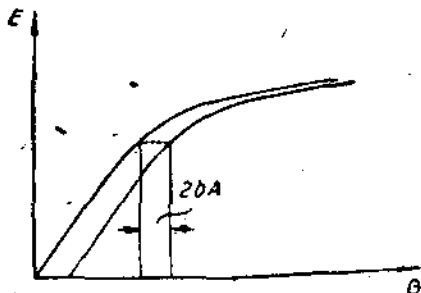
Для компенсации продольного поля необходимо иметь на полюсах соответственно большее число ампер витков. Пусть A — объем тока якоря

в амп/см, b —дуга, соответствующая $\angle \alpha$ на окружности якоря в см, тогда этот избыток ампер-витков выразится через $2bA$. Отсюда определяется нагрузочная характеристика (фиг. 56) машины со сдвинутыми щетками, для чего к кривой, построенной с учетом искажения поля, прибавляют добавочную величину $2bA$. (Для более точного подсчета не следует пренебрегать добавочной величиной рассеяния полюса и связанным с нею увеличением насыщения в полюсах и ярме благодаря увеличивающемуся магнитному напряжению в воздухе и зубцах).

При сдвиге щеток в противоположном направлении главное поле усиливалось бы под действием поля якоря; в машинах постоянного тока этот случай не имеет однако практического значения, так как при этом секции, замкнутые щетками накоротко, находились бы в сильном поле, что вызвало бы сильное искрение коллектора.

В новейших машинах не применяют сдвига щеток. Для того, чтобы щетки все же находились в зоне, лишенной поля, применяют чаще всего добавочные полюсы. Добавочное поле должно быть поэтому направлено противоположно полю якоря, что достигается узкими добавочными полюсами, устроенными по середине между-полюсного пространства. Для того, чтобы добавочное поле при всякой нагрузке уравнивало поле якоря, обмотку добавочных полюсов соединяют последовательно с обмоткой якоря.

Искажение поля под полюсными башмаками не устраняется добавочными полюсами. Для этого требуется компенсационная обмотка. Машина с компенсацией и добавочным полем—самая совершенная машина постоянного тока. У нее устраняются все недостатки реакции якоря. Характеристика холостого хода такой машины представляет одновременно и индуктированную ЭДС при нагрузке. Компенсационную обмотку предусматривают однако лишь в трудных случаях, так как она дорога стоит. Обычно довольствуются добавочным полем, обеспечивающим безискровую работу при изменяющихся нагрузках и неподвижных щетках.



Фиг. 56. Нагрузочная характеристика при сдвиге щеток.

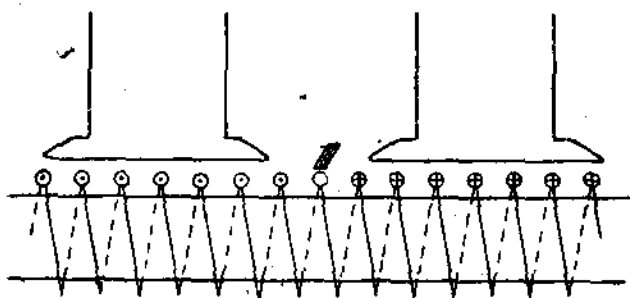
§ 7. Обмотки якоря ¹⁾.

В § 2 уже рассматривались ЭДС, индуктированные в отдельных проводниках, проходящих под полюсами. Было также показано, каким образом путем последовательного соединения суммируются отдельные ЭДС проводников и образуют ЭДС машины. Устройство целесообразной обмотки якоря заключается в том, чтобы при соединении проводников получить минимальную длину обмотки (минимальный вес меди) и легко осуществимую конструкцию.

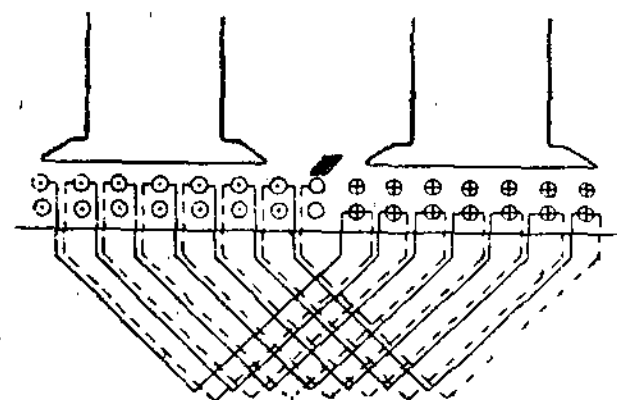
Во всех проводниках, находящихся под одним полюсом, индуктируются одинаково направленные ЭДС, тогда как в проводниках под соседними полюсами индуктируются противоположно направленные ЭДС. Проводники должны быть соединены так, чтобы их отдельные ЭДС складывались. Здесь мыслимы различные соединения; в технике получили применение следующие три устройства:

¹⁾ R. Richter. Ankerwicklungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen. Springer Berlin 1920.—Arnold-la Cour. Die Gleichstrommaschine. J. Springer, Berlin, 1919. Гл. 3, 4 и 5.

1. **Кольцевая обмотка** (фиг. 57). Каждый проводник соединяется с соседним под тем же полюсом. Якорь должен быть при этом устроен в виде полого цилиндра (кольцеобразное тело) (фиг. 65) для того, чтобы соединительные провода между отдельными индуктированными проводниками можно было проводить в пространстве, лишенном поля, а именно — внутри кольца. Кольцевая обмотка — самая первая замкнутая обмотка (Пачинотти, Грамм); в настоящее время она больше не применяется, так как в ней для соединительных проводов расходуется большое количество материала, неактивного в магнитном отношении. Кроме того, такую обмотку неудобно выполнить, так как каждый проводник должен быть протянут от руки, через отверстие кольца.



Фиг. 57. Кольцевая обмотка.



Фиг. 58. Двуслойная барабанная обмотка.

2. В новейших машинах устраивается барабанная обмотка, у которой все проводники находятся на цилиндрической поверхности якоря в магнитном поле. Барабанную обмотку можно представить себе получившейся из кольцевой обмотки. Для этого достаточно допустить, что неактивные проводники, находящиеся внутри кольцевого якоря, уложены на поверхности якоря под соседним полюсом (фиг. 58). Так как в кольцевом якоре через обратные провода ток проходит в направлении, обратном направлению в индуктируемых проводниках, то в барабанной обмотке ЭДС, индуктированная в первых под соседними полюсами, будет одинаково направлена с силой тока и усиливать последнюю.

Таким образом обратные провода кольцевой обмотки становятся активными проводами барабанной обмотки.

Как уже упомянуто (см. § 2), барабанные обмотки выполняются в виде двуслойных обмоток. У последних соединительные проводники идут от проводов верхнего слоя под одним полюсом к проводам нижнего слоя под соседним полюсом (фиг. 58). Этим достигается то, что секции, заранее изготовленные вне машины, легко укладываются в пазы.

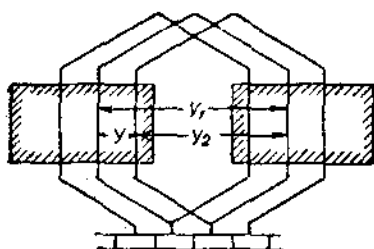
Отличительным признаком барабанной обмотки является то, что каждый провод соединен с проводом, находящимся под соседним полюсом (в противоположность кольцевой обмотке, у которой соединены соседние проводники, находящиеся под одним и тем же полюсом).

Применяются следующие два типа соединений барабанной обмотки.

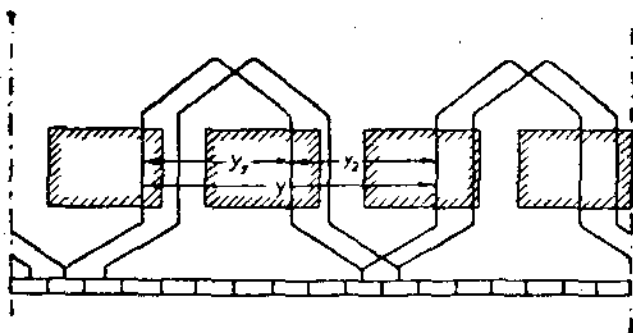
1) **Петлевая обмотка** (фиг. 59). Каждый провод соединен с проводом соседнего полюса, этот последний провод соединен опять с про-

дом первого полюса и т. д. Обмотка наматывается по окружности якоря петлеобразно.

2) Волновая обмотка (фиг. 60). Каждый провод соединен с проводом под соседним полюсом, последний же провод соединен с проводом следующего полюса и т. д. Обмотка наматывается по окружности якоря волнообразно.



Фиг. 59. Петлевая обмотка.



Фиг. 60. Волновая обмотка.

Так как каждое место соединения двух секций приключено к одной пластине коллектора, то число коллекторных пластин равно числу секций.

В схемах принято выражать все расстояния числом рядом лежащих секционных сторон на окружности якоря (шаг по коллектору). Шириной секции называют число секционных сторон y_1 , которое необходимо отсчитать для того, чтобы притти от одной стороны секции к другой (фиг. 59). Расстояние между двумя соединенными сторонами двух следующих одна за другой секций называется соединительным шагом y_2 . Последний характерен для выбранного типа соединений. При произвольно выбранном положительном направлении отсчета, y петлевой обмотки соединительный шаг y_2 будет отрицательным (фиг. 59), а y волновой обмотки — положительным (фиг. 60). Расстояние между соответствующими секционными сторонами двух соединенных вместе катушек (например между обеими левыми секционными сторонами) называется результирующим шагом y . Для петлевой обмотки (фиг. 59) он равен:

$$y = y_1 - y_2 \dots \dots \dots (85)$$

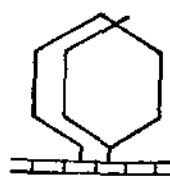
а для волновой обмотки (фиг. 60)

$$y = y_1 + y_2 \dots \dots \dots (86)$$

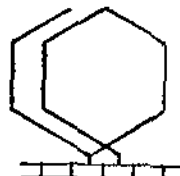
У петлевой обмотки на фиг. 59 соединительный шаг меньше ширины секции. Обмотка наматывается по окружности якоря направо. Такая обмотка называется неперекрещивающейся петлевой обмоткой. Часть последней представлена на фиг. 61.

В противоположность этому на фиг. 62 представлена часть перекрещивающейся петлевой обмотки. Здесь соединительный шаг больше ширины секции. Обмотка передвигается влево по окружности якоря.

Перекрещивающиеся и неперекрещивающиеся обмотки имеют место также и при волновых обмотках. Здесь однако необходимо рассматривать полную окружность якоря. Так как каждой паре полюсов соответствует



Фиг. 61. Неперекрещивающаяся петлевая обмотка.



Фиг. 62. Перекрещивающаяся петлевая обмотка.

одна секция, то число секций по всей окружности будет равно p (p — числу пар полюсов). Каждой секции соответствует u шагов по коллектору; таким образом, длина окружности якоря, выраженная в шагах по коллектору, будет равна pu .

Пусть k — общее число коллекторных пластин.

Если

$$pu < k, \dots \dots \dots (87)$$

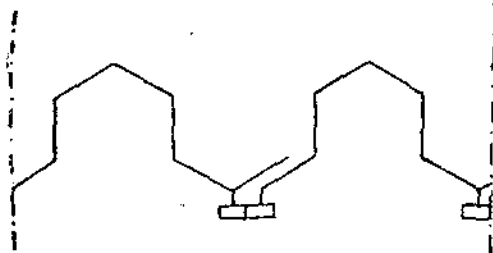
то при одном обходе окружности якоря конец не будет пересекать начало. Обмотка получится неперекрещивающаяся (фиг. 63).

Если

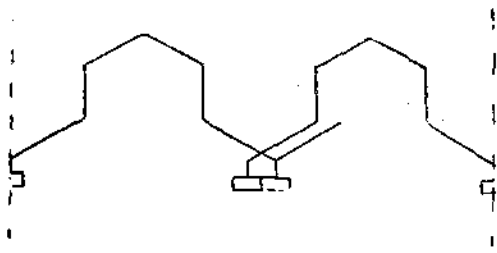
$$pu > k, \dots \dots \dots (87a)$$

то при обходе конец пересекает начало. Такая обмотка будет перекрещивающейся (фиг. 64).

Направление наматывания по окружности якоря здесь также в обоих случаях будет различно. В перекрещивающейся обмотке полярность щеток будет также обратна полярности при неперекрещивающейся обмотке.



Фиг. 63. Неперекрещивающаяся волновая обмотка.



Фиг. 64. Перекрещивающаяся волновая обмотка.

Обмотки большей частью выполняются неперекрещивающимися, так как для них требуется меньше металла.

Рассматриваемые секции имели (ради большей наглядности) лишь один виток. В действительности же секция очень часто состоит из многих последовательно соединенных витков, расположенных или рядом, или один над другим. К коллекторным пластинам подводятся лишь два конца секции, которые соединяются здесь с другими секциями. Число витков в одной секции не играет никакой роли для схемы. Мы будем поэтому и в дальнейшем давать схемы ради простоты лишь с одним витком.

Кольцевая обмотка, так же как петлевая и волновая, представляет собою замкнутую обмотку. Все секции такой обмотки соединены между собою последовательно в одну замкнутую цепь; места соединений двух секций имеют отводы, присоединяемые к коллекторным пластинам. При помощи щеток обмотка якоря присоединяется через коллектор к внешней цепи. Благодаря тому, что обмотка представляет собою замкнутую цепь, составленную из секций, она при нагрузке машины будет представлять собою [в зависимости от числа полюсов, типа соединения и числа щеток (см. § 2)] обмотку с двумя или несколькими параллельными ветвями.

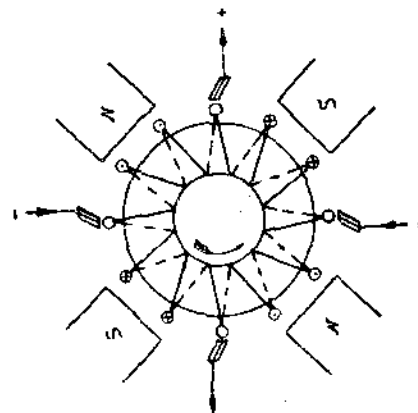
В отношении индуктированной ЭДС и сопротивления эти ветви должны быть идентичными и в них не должны создаваться уравнивающие токи и неравномерное распределение нагрузок. Для того, чтобы замкнутая обмотка была при всех положениях якоря равноценна, необходимо,

чтобы все секции имели одинаковое число витков, а в барабанных обмотках — по возможности одинаковую ширину.

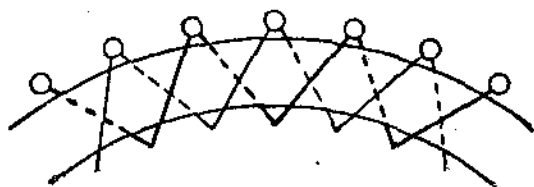
Секции кольцевой обмотки имеют в каждый момент лишь одну активную секционную сторону и не зависят поэтому от полюсного деления (числа полюсов). Кольцевой якорь может быть поэтому применен для статоров с любым числом полюсов. Необходимо лишь предусмотреть на коллекторе число щеток, равное числу полюсов (в местах соответствующих секциям в нейтральных зонах) (фиг. 65). Благодаря этому обмотка в любой момент распадается на некоторое число ветвей, находящихся между двумя щетками; эти ветви соединены друг с другом параллельно.

У кольцевой обмотки число параллельных ветвей a в цепи якоря равно числу полюсов $2a = 2p$.

Кольцевая обмотка выполнима для любого числа секций (или коллекторных пластин).



Фиг. 65. Одноходовая кольцевая обмотка.



Фиг. 66. Двуходовая кольцевая обмотка.

Если в кольцевой обмотке соединить секции не с соседними секциями, а через одну (фиг. 66), то получаются или две параллельные ветви, или же одна обмотка, замыкающаяся однако лишь после двух обходов окружности якоря (в зависимости от того, четно ли или нечетно число секций). Такие обмотки называются двухходовыми. Число ходов может быть выбрано любым; однако многоходовые обмотки встречаются редко. Для m -ходовой кольцевой обмотки мы имеем

$$2a = 2mp \dots \dots \dots (88)$$

Петлевая обмотка представляет собою в принципе видоизменение кольцевой обмотки; она имеет много общего с последней. Так, например, петлевую обмотку также можно выполнить для любого числа секций (коллекторных пластин). Однако, барабанная петлевая (а также и волновая) обмотка не может быть выполнена для статора с любым числом полюсов, так как здесь для охвата возможно большего полезного потока необходимо, чтобы ширина секции y , была приблизительно равна полюсному делению. Обмотки, у которых ширина секции y , равна полюсному делению, называются диаметрными обмотками. Для них мы имеем:

$$y_1 = \frac{k}{2p} \dots \dots \dots (89)$$

где k — число коллекторных пластин.

Эта величина должна быть целым числом. Если это не имеет места, то диаметрная обмотка невыполнима. В этом случае следует выбирать ширину секции большей или меньшей полюсного деления. Таким образом получается хордовая обмотка. Хордовые обмотки выбираются большей частью с шириной секции несколько меньшей, чем полюсное

деление, так как благодаря этому лобовые соединения оказываются короче, чем достигается экономия в металле обмоток. Хордовую обмотку предпочитают диаметральной из-за особенностей хордовой обмотки, благоприятных для коммутации (фиг. 67).

Петлевые обмотки можно выполнить также и многоходовыми, на практике применяется (и то редко) число ходов $m=2$.

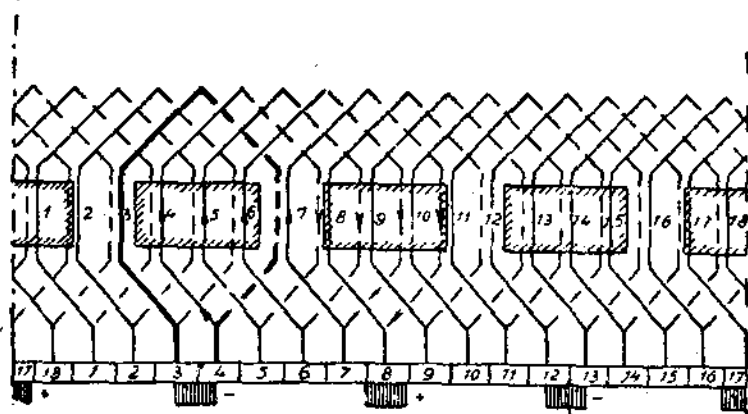
Результирующий шаг петлевой обмотки выражается (ур. 85):

$$y = (\pm) m, \dots \dots \dots (90)$$

где m — число ходов. Знак $+$ принимается для неперекрещивающихся обмоток, а знак $(-)$ для перекрещивающихся обмоток. Последних по возможности избегают

Число параллельных ветвей у петлевой обмотки такое же, как и у кольцевой (ур. 88):

$$2a = 2mp \dots \dots \dots (91)$$



Фиг. 67. Петлевая хордовая обмотка.

Благодаря наличию такого большого числа параллельных ветвей петлевая обмотка называется также параллельной обмоткой.

Большое число параллельных ветвей является характерной особенностью петлевой и кольцевой обмоток. В дальнейшем мы сравним в этом отношении наиболее простую кольцевую обмотку с волновой.

В кольцевой обмотке все секции, лежащие рядом под одним полюсом, соединены последовательно в одну ветвь. Секции, расположенные относительно других полюсов идентично в смысле магнитном и пространственном, образуют параллельные ветви.

В волновой обмотке все проводники, расположенные под полюсами идентично в магнитном и пространственном отношениях, соединены между собою последовательно на протяжении полного обхода якоря, после одного обхода обмотку не замыкают, а отводят конец к коллекторной пластине, лежащей рядом с начальной пластиной (фиг. 63); с этого момента начинается второй обход и т. д. Как уже было сказано, за один обход соединяется последовательно p секций; таким образом, ширина обхода составляет $p \cdot y$, где y — результирующий шаг (ур. 86). Общее число коллекторных пластин при волновой обмотке будет следовательно равно

$$k = py + 1, \dots \dots \dots (92)$$

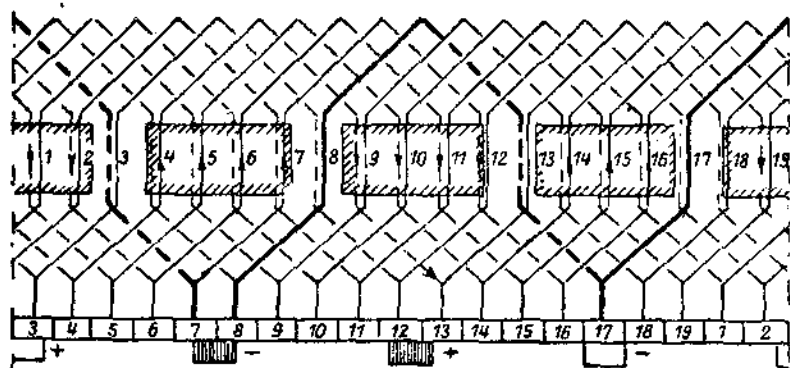
так как каждый обход заканчивается у пластины, лежащей рядом с выходной пластиной. После каждого обхода конечная пластина сдвигается на одну

пластину относительно выходной. После u обходов расстояние конца от начала будет равно u коллекторным пластинам. Следующий результирующий шаг должен, следовательно, замкнуть обмотку. Так как одному обходу соответствует p секций, то в замкнутой обмотке (u обходов и одна замыкающая секция) заключается $pu+1$ секций (ур. 92). Благодаря наложению двух разноименных щеток обмотка (как и всякая замкнутая обмотка) делится на две параллельные ветви. В четырехполюсных машинах нет необходимости добавлять щетки, так как одноименные щетки одинаково расположены относительно полюсов, а следовательно и относительно одного и того же обхода.

Число параллельных ветвей волновой обмотки для любого числа полюсов равно, следовательно:

$$2a=2 \dots \dots \dots (93)$$

Секции, расположенные одинаково под различными полюсами и принадлежащие в петлевой обмотке одной параллельной ветви, в волновой обмотке будут соединены последовательно на протяжении одного обхода. Волновую обмотку называют поэтому последовательной обмоткой



Фиг. 68. Волновая обмотка.

Волновые обмотки часто делаются многоходовыми (последовательно-параллельная обмотка); тогда мы имеем:

$$2a=2m \dots \dots \dots (94)$$

и

$$k=pu \pm m \dots \dots \dots (95)$$

Знак минус действителен для перекрещивающихся обмоток.

Как это видно из ур. (95), волновая обмотка выполнима не для всякого числа коллекторных пластин (числа секций); для выполнимости необходимо, чтобы результирующий шаг обмотки

$$y = \frac{k \mp m}{p} \dots \dots \dots (96)$$

представлял собою целое число. Благодаря этому условию может оказаться при известных условиях необходимо выполнить обмотку перекрещивающейся; однако этого следует по возможности избегать, так как для перекрещивающейся обмотки требуется большее количество металла.

Волновая обмотка не может быть выполнена в виде диаметральной обмотки, так как она замкнулась бы после первого же обхода. Ширину секции берут меньше полюсного деления, но не на много. Разница не должна быть большой, так как желательно, чтобы все проводники короткозамкнутого обхода лежали возможно ближе к нейтральной зоне (фиг. 68).

Во всех вышеприведенных рассуждениях для большей наглядности рассматривались обмотки, у которых секционные стороны, лежащие рядом на окружности якоря, расположены в различных пазах, так что каждый пазовый шаг состоит из одной лишь секционной стороны (фиг. 67 и 68).

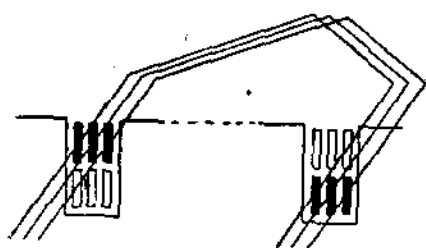
Число коллекторных пластин равно здесь числу пазов. Такие обмотки применяются однако только в машинах с небольшим числом проводов (быстроходные машины). Вообще же в одном пазовом слое расположено рядом несколько секционных сторон (фиг. 69). Число коллекторных пластин такой обмотки равно

$$k = N \cdot u, \dots \dots \dots (97)$$

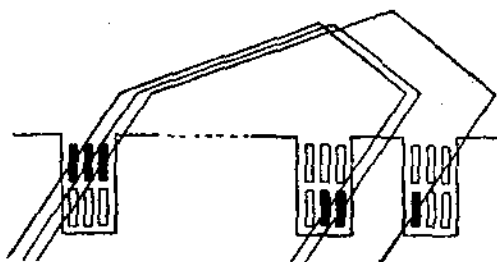
где N — число пазов, а u — число рядом лежащих в одном пазовом слое секционных сторон.

Эти обмотки могут быть выполнены двумя различными способами.

У обыкновенной обмотки все секции имеют одинаковую ширину, так что секционные стороны верхнего слоя одного паза связаны с секционными сторонами, находящимися в нижнем слое также в одном пазу (фиг. 69).



Фиг. 69. Обыкновенная обмотка при $u=3$.



Фиг. 70. Ступенчатая обмотка при $u=3$.

Такое устройство имеет то преимущество, что его легко выполнить. При расположении в одном пазу всех рядом лежащих секционных сторон последние легко покрывать общей изоляцией и удобно укладывать в открытые пазы.

У ступенчатой обмотки (фиг. 70) секции имеют различную ширину; секционные стороны, лежащие рядом в верхнем слое одного паза, связаны в нижнем слое с такими сторонами, которые расположены в разных соседних пазах.

При таком устройстве коммутация тока протекает в условиях более благоприятных, чем при обыкновенной обмотке.

У петлевой обмотки несколько ветвей соединены параллельно. При совершенно симметричном устройстве машины, все ЭДС в этих ветвях должны быть равны между собою. На деле же такой точности нельзя достигнуть из-за механических соображений. Всегда будет существовать небольшая разница между величинами воздушных зазоров под различными полюсами и в размерах железа, что обуславливает неодинаковость потоков, пронизывающих различные ветви обмотки. ЭДС в параллельно соединенных ветвях получаются тогда различными, что вызывает уравнительные токи, замыкающиеся через щетки и бесполезно их нагревающие.

Для того, чтобы уравнительные токи не проходили через щетки, устраиваются уравнительные соединения, связывающие между собою некоторые одинаково расположенные точки параллельных ветвей¹⁾, благодаря чему эти точки получают равные потенциалы.

¹⁾ E. Arnold. Aquipotentialverbindungen. Elektrot. Ztschr. 1902, S. 633.

В одноходовой волновой обмотке не требуется никаких уравнительных соединений, так как здесь проводники под различными полюсами соединены между собою последовательно и случайная разница между потоками полюсов не может сказаться. У многоходовой волновой обмотки при плохом наложении щеток могут, напротив, возникнуть разности потенциалов между одинаковыми по фазе точками различных ходов, что может способствовать искрению щеток. Поэтому и в многоходовых волновых обмотках устраиваются уравнительные соединения.

Для того, чтобы устройство уравнительных соединений оказалось возможным, в обмотках должны иметься точки, одинаковые по фазе. Этим требованием ограничивается условие выполнимости обмоток в отношении числа коллекторных пластин¹⁾.

По характеру работы волновые и петлевые обмотки отличаются между собою, что должно быть соответствующим образом учтено при проектировании машины.

Как уже сказано, волновая обмотка менее чувствительна к действию неодинаковых потоков под различными полюсами, чем петлевая обмотка (эта неодинаковость потоков может возникнуть из-за механических неточностей в конструкции, износа подшипников и т. д.). Правда, в петлевых обмотках щетки освобождаются от уравнительных токов при помощи соответствующих уравнительных соединений; эти токи, однако, проходят через обмотку и нагревают ее, чем ухудшают коэффициент полезного действия машины.

Петлевая обмотка менее чувствительна, чем волновая, к неодинаковым переходным сопротивлениям между щеткой и коллектором. В волновой обмотке на концах одной ветви обмотки наложена в любой момент лишь одна пара щеток; остальные щетки подводят ток к обмотке лишь последовательно через промежуточные секции, которые в данный момент как раз замкнуты накоротко щетками. Напротив, у петлевой обмотки все щетки наложены непосредственно на концах ветвей обмотки. Поэтому в отношении коммутации тока следует петлевой обмотке отдать предпочтение над волновой; таким образом, во всех трудных случаях (высокое число оборотов, большие мощности) следует применять петлевую обмотку.

При проектировании машины постоянного тока уделяют большое внимание использованию пазового пространства, так как это оказывает сильное влияние на размеры машины. Чем больше число проводов в пазу, тем большая доля пазового пространства падает на изоляцию. Наиболее благоприятной в смысле использования пазового пространства является стержневая обмотка, у которой каждая секционная сторона состоит из одного лишь провода (стержня).

Потребное число проводов определяется из ур. (30):

$$\frac{z}{2a} = \frac{60E}{n} \cdot \frac{1}{2 \cdot p \cdot \Phi} \dots \dots \dots (98)$$

Для машин, рассчитанных на высокое напряжение и небольшое число оборотов, целесообразно выбрать обмотку с $2a=2$, следовательно, волновую обмотку для того, чтобы число проводов не оказалось слишком большим. (У двухполюсных машин петлевая обмотка также имеет $2a=2p=2$; у них благодаря большей простоте устройства секций принята исключительно петлевая обмотка).

¹⁾ R. Richter. Ueber die Ausführbarkeit von Gleichstrom - Ankerwicklungen. Archiv f. Elektrotechnik 2, 443, 1914.

Суммарный индукционный поток $2p\Phi$ возрастает с увеличением поверхности якоря. Таким образом, при одинаковом $\frac{E}{n}$ число последовательно соединенных проводов $\frac{z}{2a}$ будет уменьшаться с увеличением размеров машины. В крупных машинах с большим числом оборотов число проводов настолько мало, что может оказаться желательным многократное параллельное соединение. Для многополюсной машины берут тогда многоходовую волновую обмотку, а для небольшого числа полюсов и для особенно трудных условий эксплуатации (турбогенераторы) выбирается одноходовая петлевая обмотка.

Наконец, при проектировании обмотки якоря постоянного тока следует еще уделить внимание и максимальному напряжению между соседними коллекторными пластинами. Это напряжение не должно превосходить 35 вольт.

Среднее напряжение между коллекторными пластинами при холостом ходе равно

$$e_{\text{см}} = \frac{U}{k} \cdot 2p, \dots \dots \dots (99)$$

где U — напряжение у зажимов и k — число коллекторных пластин.

Соответственно отношению средней индукции на окружности якоря при холостом ходе к максимальной, среднее напряжение между пластинами будет составлять около 66% от максимального при холостом ходе. В машинах без компенсационной обмотки максимальное напряжение между пластинами при нагрузке возрастает из-за искажения поля (§ 6) приблизительно в полтора раза. При напряжении между пластинами большем, чем 35 вольт, возникает опасность образования кругового огня на коллекторе во время эксплуатации. При известных обстоятельствах может оказаться необходимым повысить число параллельных ветвей, чтобы благодаря этому увеличить число пластин, а тем самым достигнуть меньшего напряжения между последними.

§ 8. Коммутация тока ¹⁾.

Замкнутая обмотка двухполюсной машины постоянного тока делится при помощи двух щеток при нагрузке на две параллельные ветви. Если придать секциям обмотки определенное направление отсчета, то при нагрузке по всем секциям одной ветви ток будет проходить в положительном направлении, а по всем секциям другой ветви — в отрицательном направлении. Так как параллельные ветви все время сохраняют свое положение в пространстве относительно полюсов, то во вращающемся якоре по отдельным секциям обмотки должен попеременно проходить ток то в положительном, то в отрицательном направлении, в зависимости от того, принадлежат ли эти секции в данный момент одной или другой ветви.

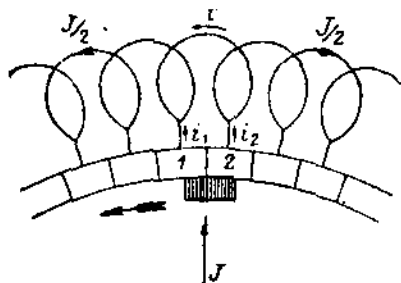
¹⁾ P. Girault. Sur la commutation dans les dynamos à courant continu. Industrie électrique 1898, S. 153, 180, 202, 231, 250.—J. Fischer-Hinnen. Die Beurteilung von Gleichstrommaschinen mit Bezug auf die Funkenbildung. Elektrot. Ztschr. 1896, S. 588, 598.—Über die Funkenbildung an Gleichstrommaschinen. Elektrot. Ztschr. 1898, S. 850, 867.—Theorie der Kommutation. Elektr. Ztschr. 1899, S. 732; Gleichstrommaschinen. 5. Auflage, Zurich 1904.—E. Arnold und G. Mie. Stromwendung bei Gleichstrommaschinen. Elektr. Ztschr. 1898, S. 97.—C. C. Hawkins. The theory of commutation. The electrician 45, 19, 44, 1900.—H. Rothert. Beitrag zur Theorie der Stromwendung. Elektr. Ztschr. 1902, S. 865, 884.—R. Rüdenberg Theorie der Kommutation. Enke, Stuttgart, 1907.—Arnold-la-Cour. Die Gleichstrommaschine, 1. 217. ff.—K. Pichelmayer. Dynamobau (Bd. 5 des Handbuches der Elektrotechnik), S. 86. f.—Hirzel, Leipzig, 1908.—R. Richter. Die Elektrischen Maschinen 1. 388 ff, Springer Berlin 1924.—L. Dreyfus. Ein neuer Weg zum Ausbau der Kommutierungstheorie. Archiv f. Elektrotechnik 12. 286 u 398. 1924.

Коммутация тока осуществляется в то время, когда секция, проходя в нейтральной зоне, замыкается щеткой накоротко. В дальнейшем мы рассмотрим процессы, имеющие место при коммутации, так как они играют крупную роль при эксплуатации машин постоянного тока. Лишь после уяснения этих процессов оказалась возможной удовлетворительная эксплуатация машин постоянного тока больших мощностей.

На фиг. 71 схематически представлена часть обмотки с присоединенными к ней коллекторными пластинами. Здесь I — сила тока, входящего извне в щетку. Ширина щетки пусть равняется ширине пластины. Если щетка прикасается только к одной пластине, то весь ток будет проходить через провод, соединяющий пластину с обмоткой, после чего разветвится и потечет по правой и левой ветвям обмотки. Если же щетка находится одновременно на двух соседних пластинах, то она замыкает при этом секцию, связанную с последними при помощи соединительных проводов; при этом ток из щетки течет через оба соединительных провода в ветви обмотки.

Обозначив через i_1 и i_2 токи в соединительных проводах, мы будем иметь для каждого мгновения силу тока, равную

$$i_1 + i_2 = I \dots \dots \dots (100)$$



Фиг. 71. Коммутация тока.

Токи в соединительных проводах в общем случае различны и изменяются во время коммутации. Так как токи $\left(\frac{I}{2}\right)$ в обеих ветвях все время равны друг другу и неизменны, то через коротко-замкнутую секцию должен проходить меняющийся во время коммутации ток i , выравнивающий токи в соединительных проводах. Выберем для обмотки произвольно какое-либо направление в качестве положительного, например, направление, по которому ток проходит после коммутации (влево на фиг. 71). Тогда мы будем иметь для каждого момента коммутации:

$$i_1 = \frac{I}{2} - i \dots \dots \dots (101)$$

$$i_2 = \frac{I}{2} + i \dots \dots \dots (102)$$

Пусть при $t=0$ щетка прикасается только к пластине 1. Через секцию, вступающую в короткое замыкание, проходит ток ответвления; соответственно этому для $t=0$ мы имеем:

$$i = -\frac{I}{2} \dots \dots \dots (103)$$

$$i_1 = I \dots \dots \dots (104)$$

$$i_2 = 0 \dots \dots \dots (105)$$

В следующее мгновение щетка прикасается также к пластине 2 и замыкает при этом секцию, присоединенную к этим пластинам. Теперь через соединительный провод от пластины 2 будет проходить ток i_2 , который будет увеличиваться во времени t по мере возрастания той части поверхности щетки, которая соприкасается с пластиной 2. Одновременно, согласно ур. (100), должна уменьшаться величина i_1 . Согласно ур. (101) и (102) при этом будет изменяться ток i в коротко-замкнутой секции; его

абсолютная величина с уменьшением i_1 уменьшается от $i = -\frac{I}{2}$ для $t=0$ (ур. 103) и становится равным

$$i = 0 \dots \dots \dots (106)$$

при

$$i_1 = i_2 = \frac{I}{2} \dots \dots \dots (107)$$

В дальнейшем процессе коммутации i становится положительным. Для $t=T$ коммутация заканчивается и сбегаящий конец щетки покидает пластину I. Для $t=T$ получается

$$i = +\frac{I}{2} \dots \dots \dots (108)$$

$$i_1 = 0 \dots \dots \dots (109)$$

$$i_2 = I \dots \dots \dots (110)$$

Между значениями $t=0$ и $t=T$ ток i в коротко-замкнутой секции меняется от $-\frac{I}{2}$ до $+\frac{I}{2}$ различным образом, в зависимости от постоянных цепи и от ЭДС, индуктируемых в секции в период коммутации. Сопротивление цепи состоит из переходных сопротивлений R между щетками и коллекторными пластинами, из сопротивления в соединительных проводах R_s и сопротивления R_k коротко-замкнутой секции. Индуктированные электродвижущие силы таковы: ЭДС самоиндукции, благодаря изменению тока в коротко-замкнутой секции, и ЭДС движения, индуктируемая в движущихся проводах коротко-замкнутой секции под действием неподвижного в пространстве результирующего поля (главного поля, поля якоря, а в некоторых случаях и дополнительного поля, см. § 6).

Пренебрегаем сначала всеми ЭДС, индуктированными в цепи. Такой случай называется коммутацией сопротивлением. Рассмотрим и здесь сначала простейший случай. Будем считать, что сопротивлением секции и соединительных проводов можно пренебречь по сравнению с переходным сопротивлением.

Переходное сопротивление между щеткой и коллекторной пластиной обратно пропорционально той части поверхности щетки, которая соприкасается с данной пластиной. Эта часть поверхности для пластины 2 пропорциональна времени соприкосновения t , а для пластины I — времени $T-t$. Переходные сопротивления соответственно равны

$$R_1 = R \frac{T}{T-t}, \dots \dots \dots (111)$$

$$R_2 = R \frac{T}{t} \dots \dots \dots (112)$$

Для замкнутой цепи мы имеем по второму закону Кирхгоффа:

$$i_1 \cdot R_1 - i_2 \cdot R_2 = 0, \dots \dots \dots (113)$$

или, вместе с ур. (111) и (112),

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{T-t}{t} \dots \dots \dots (114)$$

или

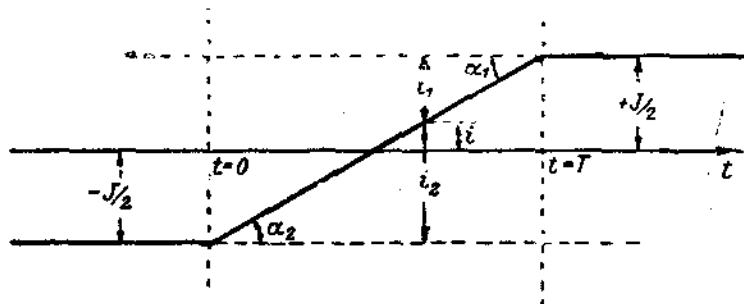
$$\frac{i_1 + i_2}{i_2} = \frac{T}{t}, \dots \dots \dots (115)$$

что дает вместе с ур. (100) и (102):

$$i = \frac{I}{2} \left(2 \frac{t}{T} - 1 \right) \dots \dots \dots (116)$$

Если нанести графически функцию $i=f(t)$ согласно вышеприведенному уравнению, то для кривой коммутации мы получим прямую линию (фиг. 72), отчего этот случай и носит название прямолинейной коммутации. Из фигур легко определить также и значения i_1 и i_2 для каждого мгновения, так как они, согласно ур. (101) и (102), связаны друг с другом постоянной величиной i .

Абсцисса t какой-либо точки кривой коммутации (при отсчете от $t=0$) пропорциональна той части поверхности щетки, которая соприкасается с пластиной 2. Соответственно этому, абсцисса $T-t$ (при отсчете от $t=T$) будет пропорциональна той части поверхности щетки, которая сопри-



Фиг. 72. Прямолинейная коммутация.

касается с пластиной 1. Величины i_2 и i_1 — это токи, текущие через эти части поверхности щетки в обе пластины. Плотности токов в обеих частях поверхности щетки пропорциональны, следовательно, величинам

$$\frac{i_2}{t} \quad \text{и} \quad \frac{i_1}{T-t}.$$

Так как

$$\frac{i_1}{T-t} = \operatorname{tg} \alpha_1 \dots \dots \dots (117)$$

$$\frac{i_2}{t} = \operatorname{tg} \alpha_2 \dots \dots \dots (118)$$

то не трудно определить из фиг. 72 и плотность тока на поверхности соприкосновения щеток.

При прямолинейной коммутации за все время процесса мы имеем:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \operatorname{tg} \alpha_2 = \operatorname{const} \dots \dots \dots (119)$$

Плотность тока, следовательно, все время равномерно распределена по поверхности соприкосновения щеток.

При прямолинейной коммутации ток в коротко-замкнутой секции достигает значения $i=0$ в момент времени $t = \frac{T}{2}$.

Если же учесть еще и сопротивление в секции и в соединительных проводах, то из второго закона Кирхгофа мы будем иметь для этой цепи (фиг. 71):

$$i_1 \cdot R_1 + i_1 \cdot R_{c1} - i \cdot R_s - i_2 \cdot R_{c2} - i_2 \cdot R_2 = 0 \dots \dots \dots (120)$$

В дальнейшем мы будем считать сопротивления в соединительных проводах одинаковыми

$$R_{c1} = R_{c2} = R_c.$$

Принимая для i_1 и i_2 выражения из ур. (101) и (102), а для R_1 и R_2 — выражения из ур. (111) и (112), и соединив сопротивления коротко-замкнутой катушки и обоих соединительных проводов одним обозначением

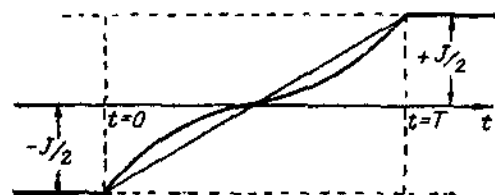
$$R_k = R_s + 2R_n \dots \dots \dots (121)$$

мы получим после простого преобразования величину тока i в коротко-замкнутой секции равной:

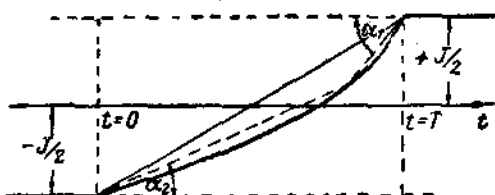
$$i = \frac{\frac{I}{2} \left(2 \frac{t}{T} - 1 \right)}{1 + \frac{R_k}{R} \left[\frac{t}{T} - \left(\frac{t}{T} \right)^2 \right]} \dots \dots \dots (122)$$

Числитель этого выражения идентичен с ур. (116) для прямолинейной коммутации. Знаменатель всегда положителен и никогда не может быть < 1 .

При учете сопротивлений в секции и соединительных проводах, абсолютные значения ординат кривой прямолинейной коммутации будут, следовательно, меньше. Кривая коммутации получает вид, изображенный



Фиг. 73. Коммутация при сопротивлениях.



Фиг. 74. Замедленная коммутация.

на фиг. 73. При $t=0$ и $t=T$ знаменатель $= 1$, при $t = \frac{T}{2}$ числитель, а следовательно, и i равны нулю. В этих трех точках кривая совпадает с кривой прямолинейной коммутации.

Отклонение от прямолинейной коммутации тем значительнее, чем величина R_k больше в сравнении с R . В машинах постоянного тока отклонение незначительно. В коллекторных машинах переменного тока для уменьшения токов, индуцируемых пульсирующим главным полем в коротко-замкнутых секциях, включают в цепь соединительных проводов сопротивления, благодаря которым отклонение от прямолинейной коммутации может стать значительным.

В сравнении с прямолинейной коммутацией здесь увеличивается плотность тока у набегающего края щетки в начале коммутации и у сбегающего края в конце коммутации. В этом нетрудно убедиться из соответствующего $\angle \alpha$ по фиг. 73. Неравномерное распределение плотности тока на поверхности щетки является недостатком, так как щетки приходится выбирать более крупных размеров.

Изменение тока в коротко-замкнутой секции замедляется благодаря влиянию самоиндукции. Ток достигает значения $i=0$ несколько позже момента $t = \frac{T}{2}$; этот случай носит название замедленной коммутации (фиг. 74). Так как здесь:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 > \operatorname{tg} \alpha_2 \dots \dots \dots (123)$$

то плотность тока под сбегающим краем щетки всегда больше, чем под набегающим краем. Это может повести к горению сбегающего края щетки.

Если нормальная слагающая индукции на окружности якоря не равна нулю в тех местах, где находятся провода секции, замкнутой накоротко щеткой, то в этой секции будет индуцироваться ЭДС движения; последняя, в зависимости от ее направления, может или замедлить или ускорить коммутацию.

Согласно § 6, у генератора без компенсационной обмотки и дополнительного полюса магнитное поле сдвигается при нагрузке в направлении вращения. Если щетки при этом находятся в геометрически нейтральной зоне, то благодаря сдвигу поля в коротко-замкнутой секции будет индуцироваться ток, имеющий то же направление, что и ток до коммутации. Коммутация, следовательно, замедляется.

Под действием этой ЭДС движения усиливается отрицательное влияние самоиндукции и увеличивается отклонение от прямолинейной коммутации. При помощи сдвига щеток или подбором соответствующих вспомогательных полей (§ 6) можно добиться, чтобы коротко-замкнутая секция оказалась в зоне, лишенной поля. При дальнейшем перемещении щеток (или усилении вспомогательного поля) в коротко-замкнутой секции может индуцироваться ЭДС движения, имеющая то же направление, что и ток после коммутации, следовательно, ускоряющая последнюю.

На фиг. 75 представлены две кривые ускоренной коммутации. Кривая *a* благоприятна для коммутации, так как она дает лишь незначительную плотность тока у сбегающего края щетки. Кривая *b* изображает перекоммутирование из-за слишком сильного вспомогательного поля.

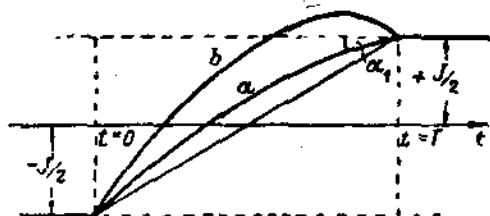
В общем случае, учитывая ЭДС самоиндукции и ЭДС движения, мы получим дифференциальное уравнение коммутации:

$$i_1 R_1 + i_1 R_s - i R_s - i_2 R_s - i_2 R_2 = L \frac{di}{dt} + e \dots \dots (124)$$

При составлении этого уравнения приняты направления токов, указанные на фиг. 71. (В соединительных проводах ток всегда направлен от коллекторной пластины к секции; в самой секции направление тока после коммутации принято положительным). За направление отсчета принято направление часовой стрелки. Поэтому в уравнении i_1 будет положительным, а i и i_2 — отрицательными. ЭДС самоиндукции поддерживает ток, шедший до коммутации; она, следовательно, направлена противоположно току i и берется поэтому по направлению отсчета: величина $L \frac{di}{dt}$ будет в уравнении положительной. При этом положительной ЭДС движения e будет та, которая, подобно ЭДС самоиндукции, замедляет коммутацию. Как уже доказано, в случае генератора, это будет та ЭДС, которая создается в коротко-замкнутой секции под действием результирующего поля без вспомогательного (при расположении щеток в геометрической нейтральной зоне).

Дифференциальное уравнение, преобразованное при помощи ур. (101), (102), (111), (112) и (121), гласит:

$$\left(\frac{1}{2} - i\right) R \frac{T}{T-i} - i R_s - \left(\frac{1}{2} + i\right) R \frac{T}{T+i} = L \frac{di}{dt} + e \dots \dots (125)$$



Фиг. 75. Ускоренная коммутация.

Решение этого дифференциального уравнения, данное Арнольдом и Ми (Arnold u. Mie), завело бы нас слишком далеко; ограничимся поэтому ссылкой на литературу¹⁾.

При помощи общего дифференциального уравнения коммутации можно наглядно изучить некоторые характерные случаи.

Если e положительна, то действие самоиндукции усиливается: коммутация сильно замедляется (фиг. 74).

Если ЭДС движения отрицательна и равна ЭДС самоиндукции

$$e = -L \frac{di}{dt}, \dots \dots \dots (126)$$

то правая часть уравнения превращается в нуль. Уравнение в этом случае идентично с ур. (120) для коммутации сопротивлением (фиг. 73).

Если ЭДС движения отрицательна и больше, чем ЭДС самоиндукции, то коммутация будет ускоренной (фиг. 75 а и б).

В отношении распределения плотности тока на контактной поверхности щеток коммутация сопротивлением будет наиболее благоприятной; плотность тока здесь за все время коммутации будет равномерно распределяться по контактной поверхности щетки, если отношение $\frac{R_k}{R}$ (ур. 122) будет достаточно мало. Для выполнения последнего условия в машинах постоянного тока употребляются угольные щетки, обладающие большим переходным сопротивлением R .

Громадное значение для коммутации имеет напряжение между коллекторной пластиной и сбегавшим краем щетки в момент разрыва коротко-замкнутой цепи, т. е., следовательно, в момент $t=T$, так как это напряжение может явиться причиной возникновения искрения под щетками.

При $t=T$ ток i в коротко-замкнутой секции переходит в ток ответвления: $i = \frac{I}{2}$. Одновременно с этим

$$\lim_{t \rightarrow T} \frac{1}{2} \frac{di}{dt} = \frac{di}{dt} \dots \dots \dots (127)$$

Это изменение тока определяет ЭДС самоиндукции при разрыве коротко-замкнутой цепи; оно представлено касательной к кривой коммутации при $t=T$. Если e_T — ЭДС движения при $t=T$, то для этого мгновения ур. (125) гласит:

$$RT \cdot \frac{di}{dt} - \frac{1}{2} R_k - IR = L \frac{di}{dt} + e_T \dots \dots \dots (128)$$

Отсюда получается ЭДС самоиндукции при разрыве коротко-замкнутой цепи:

$$\lim_{t \rightarrow T} L \frac{di}{dt} = \frac{e_T + \frac{1}{2} (R_k + 2R)}{\frac{RT}{L} - 1} \dots \dots \dots (129)$$

С возрастанием e_T возрастает и ЭДС самоиндукции $L \frac{di}{dt}$. Положительная ЭДС движения замедляет коммутацию; при этом касательная к кривой (фиг. 74) в конце коммутации становится крутой.

С уменьшением e_T уменьшается и $L \frac{di}{dt}$ в ур. (129). Для

$$e_T = -\frac{1}{2} (R_k + 2R) \dots \dots \dots (130)$$

¹⁾ E. Arnold und G. Mie. Stromwendung bei Gleichstrommaschinen. Elektrot. Ztschr. 1899, S. 97.

числитель в ур. (129) становится равным нулю. При разрыве цепи никакой ЭДС самоиндукции при этом не возникает. Такому случаю соответствует кривая *a* ускоренной коммутации на фиг. 75. Касательная в точке $t=T$ — горизонтальна.

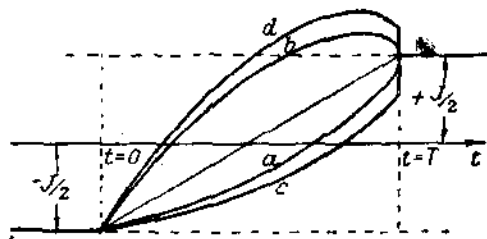
Если e_T еще более отрицательна, то величина $L \frac{di}{dt}$ меняет свой знак. Этому соответствует перекоммутация (кривая *b* на фиг. 75).

Вышеприведенные рассуждения правильны лишь при том предположении, что знаменатель в ур. (129) положителен:

$$\frac{RT}{L} > 1 \dots \dots \dots (131)$$

Чем больше $\frac{RT}{L}$ относительно единицы, тем меньше $L \frac{di}{dt}$. Также и это обстоятельство говорит в пользу применения угольных щеток, обладающих большим переходным сопротивлением R . При $\frac{RT}{L} = 1$ величина $L \frac{di}{dt}$ становится бесконечной (*a* и *b* на фиг. 76); касательная к кривой при $t=T$ перпендикулярна к оси абсцисс. Если $\frac{RT}{L} < 1$, то кривая тока коммутации резко переходит в ток разветвления (*c* и *d* на фиг. 76). Благодаря такому внезапному изменению тока ЭДС самоиндукции теоретически должна возрасти до бесконечности; при этом у сбегającego края следует ожидать сильного искрения.

Для того чтобы при разрыве коротко-замкнутой цепи ЭДС самоиндукции осталась конечной величиной, необходимо, следовательно, соблюсти условие из ур. (131).



Фиг. 76. Неполная коммутация.

Виды коммутации, обычно желательные на практике, следующие:

1) Прямолинейная коммутация, при которой плотность тока под щетками является все время постоянной величиной. Здесь ЭДС самоиндукции должна уравниваться равной и противоположной ЭДС движения (ур. 126).

2) Ускоренная коммутация (по кривой *a* на фиг. 75), при которой ЭДС самоиндукции при размыкании коротко-замкнутой цепи исчезает (ур. 130).

Так как невозможно объединить эти оба преимущества, то выбирают некоторую среднюю кривую коммутации, расположенную между обеими благоприятными кривыми.

При проектировании целесообразно исходить из прямолинейной коммутации, так как здесь за все время коммутации величина $\frac{di}{dt}$, а тем самым и ЭДС самоиндукции, представляет собою постоянную величину. Эта ЭДС может быть уничтожена постоянной ЭДС движения. Необходимое для этой цели поле создается вспомогательным или дополнительным полюсом. Ампер-витки дополнительного полюса должны быть рассчитаны так, чтобы под их действием, во-первых, уничтожалось вредное поле якоря в коммутационной зоне (§ 6) и, во-вторых, создавалось полезное дополнительное поле, которое уравнивало бы ЭДС самоиндукции в коротко-замкнутой секции при помощи равной и противоположной ЭДС

движения (ур. 26). При таком расчете дополнительных полюсов получается чистая коммутация сопротивлением. Целесообразно несколько усилить рассчитанную величину дополнительного поля с целью получения умеренной ускоренной коммутации, а тем самым и ослабления ЭДС самоиндукции при разрыве коротко-замкнутой цепи.

Расчетная ширина башмака дополнительного полюса берется равной ширине коммутационной зоны.

Коммутационной зоной называется часть окружности якоря, заключающая секционные стороны, принадлежащие секциям, коротко-замкнутым в данный момент щеткой (отсчет ведется от середины паза). Для получения дополнительного поля, соответствующего каждой нагрузке, обмотку дополнительных полюсов соединяют последовательно с обмоткой якоря.

Дополнительное поле может быть достигнуто также при помощи соответствующего сдвига щеток. Это, однако, связано с большими недостатками. Такое дополнительное поле не постоянно по окружности якоря. При изменении нагрузки приходится все время передвигать щетки для получения дополнительного поля, соответствующего нагрузке. Наконец, возникает также падение напряжения, вызываемое противодействующим полем при сдвиге щеток (§ 6).

Из этих соображений устраиваются дополнительные полюса во всех новейших машинах постоянного тока, что дает последним возможность при неподвижных щетках работать практически без всякого искрения при всех нагрузках.

Индуктивность L коротко-замкнутых секций (ур. 126) состоит из индуктивности пазов и индуктивности лобовых соединений, при чем следует учесть не только самоиндукцию рассматриваемой секции, но и взаимную индукцию от остальных секций, одновременно находящихся в состоянии короткого замыкания¹⁾. Благодаря этой взаимной индукции величина L , вообще говоря, не бывает постоянной за все время коммутации, в случае если последняя не протекает одновременно в коротко-замкнутых секциях. Это имеет место, например, в том случае, когда в пазу расположено рядом несколько секционных сторон, а щетка шире одного коллекторного деления; в этом случае число секционных сторон одного паза, одновременно находящихся в состоянии короткого замыкания, для различных мгновений будет различно. Полное уничтожение ЭДС самоиндукции при помощи постоянной ЭДС движения здесь невозможно.

Целесообразно по возможности ограничить индуктивность коротко-замкнутой секции. Поэтому в машинах постоянного тока устраивают открытые пазы, так как в последних магнитная проводимость поперечного пазового поля незначительна. Кроме того, стараются избегать диаметральных обмоток, так как в последних стороны двух секций, замкнутых накоротко разноименными щетками, лежат в верхнем и нижнем слоях одного и того же паза, благодаря чему увеличивается индуктивность (фиг. 77).

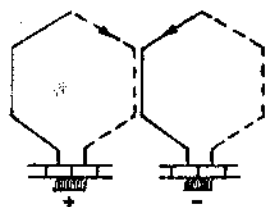
При хордовых обмотках стороны секций, одновременно замкнутых разноименными щетками, расположены точно также одна относительно другой, но в различных пазах; взаимная индукция здесь будет ничтожна (фиг. 78).

В особенности следует обращать внимание на индуктивность в конце процесса коммутации (конечная индуктивность). Последняя должна оставаться возможно меньшей для того, чтобы в момент разрыва цепи короткого замыкания (ур. 129) ЭДС самоиндукции была небольшой, что дает возможность избежать искрения на коллекторе.

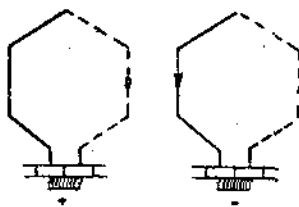
¹⁾ К. И. Шенфер. Динамо-машины пост. тока. ГИЗ, 1927, ч. I. стр. 92—102.

Наиболее неблагоприятными в отношении конечной индуктивности являются обмотки, у которых две секционные стороны одного паза принадлежат коротко-замкнутым цепям, размыкаемым в одно и то же мгновение (диаметральные обмотки, фиг. 77).

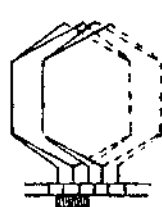
Коммутация протекает благоприятно и тогда, когда цепь короткого замыкания в момент размыкания магнитно сопряжена с другой цепью, находящейся еще в состоянии короткого замыкания. Эта вторая цепь действует здесь как коротко-замкнутая вторичная обмотка трансформатора, уменьшающая ЭДС самоиндукции в первичной цепи (в рассматриваемом случае в секции, выходящей из состояния короткого замыкания). Примером может служить обмотка с двумя секционными сторонами, лежащими рядом в одном пазу (см. фиг. 79); здесь щетка шире коллекторного деления. В момент, представленный на фигуре, первая секция, лежащая в пазу, выходит из короткого замыкания, вторая секция в пазу в это время еще замкнута коротко и ослабляет конечную индуктивность первой. При раз-



Фиг. 77. Сильное взаимное действие в диаметральных секциях.



Фиг. 78. Слабое взаимное действие в хордовых секциях.



Фиг. 79. Секции с $u = 2$.

мыкании коротко-замкнутой цепи второй секции первая уже не будет находиться в состоянии короткого замыкания; конечная индуктивность второй секции таким образом больше конечной индуктивности первой секции. Вообще говоря, в обычных обмотках секция, выходящая в одном пазу последней из короткого замыкания, обнаруживает конечную индуктивность большую, чем другие секции. В ступенчатых обмотках (§ 7) эта разница уменьшается.

При обмотках с одной лишь секционной стороной в пазовом слое рекомендуется взять отношение числа пластин к числу пар полюсов нечетным, так как при этом коммутация под одноименными щетками имеет место в различные моменты времени, благодаря чему уменьшается конечная индуктивность¹⁾.

§ 9. Потери, коэффициент полезного действия, нагревание.

При превращении энергии в электрических машинах возникают потери, электрическая машина воспринимает энергию одного вида больше, чем отдает энергию другого вида. Разница между получаемой и отдаваемой энергией превращается во время эксплуатации в тепловую энергию, представляющую собою в данном процессе энергию потерь.

Следует различать три главных группы потерь: механические, электрические и магнитные потери.

Механические потери возникают благодаря трению в подшипниках, о воздух, а также трению щеток о коллектор.

Валы электрических машин вращаются большей частью в скользящих подшипниках, потери в которых зависят от размеров шеек, их

¹⁾ R. Richter. Ankerwicklungen. S. 115 ff. Springer, Berlin, 1920.

окружной скорости, температуры, вязкости масла и давления в подшипнике ¹⁾.

Для средних и малых машин потери от трения в подшипниках при температуре их в 50° С могут быть определены по следующей приближенной формуле:

$$V_R \approx 0,52 d l v^{1.5} \text{ ватт, } \dots \dots \dots (132)$$

где d — диаметр шейки в см, l — длина шейки в см и v — окружная скорость шейки в м/сек.

Для отведения тепла, возникающего в машине благодаря потерям, мимо горячих ее частей пропускаяют охлаждающий воздух. Необходимое количество воздуха должно засасываться при помощи вращающихся частей машины, выполненных для этой цели соответствующим образом (вентилятор, воздушные каналы), и передаваться к охлаждаемым поверхностям. Потребная для этой цели механическая энергия представляет собою потерю от трения о воздух. Эта потеря может быть определена, как для вентиляторов, из количества доставляемого воздуха и скорости точки на внешней окружности вращающейся части

$$V_L \approx 1,1 V \cdot v^2 \text{ ватт, } \dots \dots \dots (133)$$

где V — количество доставляемого воздуха в м³/сек, а v — окружная скорость якоря в м/сек ²⁾.

Потери от трения под щетками сильно зависят от материала щеток, от давления щеток на коллектор, от поверхности их соприкосновения и от окружной скорости коллектора:

$$V_B = 9,81 \mu \cdot p \cdot F \cdot v \cdot \text{ватт, } \dots \dots \dots (134)$$

где μ — коэффициент трения, зависящий от материала щеток и составляющий приблизительно от 0,15 до 0,3 ³⁾, p — давление щеток в кг/см² (составляет в среднем 0,1—0,15 кг/см²), F — контактная поверхность щеток в см² и v — окружная скорость коллектора в м/сек.

Электрические потери вызываются джоулевым теплом в обмотках машины. Таким образом, потери в обмотках возбуждения равны

$$V_e = i_e^2 \cdot r_e \text{ ватт, } \dots \dots \dots (135)$$

а потери в обмотке якоря

$$V_A = I_A^2 \cdot R + U_B \cdot I_A \text{ ватт. } \dots \dots \dots (136)$$

Для величины R здесь принимается сумма сопротивлений обмотки якоря R_A , обмотки дополнительных полюсов R_n и компенсационной обмотки R_K , если она имеется. Сопротивление обмотки якоря равно:

$$R_A = \rho \cdot \frac{l_m \cdot z}{(2a)^2 \cdot q} \text{ ом } \dots \dots \dots (137)$$

Удельное сопротивление электролитической меди хорошего качества составляет при 20° С $\rho = 0,01724 \Omega \cdot \text{мм}^2/\text{м}$. Джоулевы потери следует при-

¹⁾ B. Tower. Über Lagerreibung. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers. 1883 стр. 632—G. Dettmar, Neue Versuche über Lagerreibung und Berechnung. Dinglers politisch-technisches Journal. 1900 стр. 88—R. Striebeck. Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager. Ztschr. d. Vereins deutscher Ingenieure 46, 1340. 1902.

²⁾ L. Binder. Wärmeübergang, Luftweg und Kühlung elektrischer Maschinen. W. Kaapp. 1911.

³⁾ R. Richter. Elektrische Maschinen. 1, 237. Springer, Berlin, 1924.

нять для нагретой меди соответственно температуре t во время эксплуатации. При этом мы имеем:

$$\rho_t = \rho_{20} [1 + \alpha (t - 20)], \dots \dots \dots (138)$$

где температурный коэффициент следует принять равным

$$\alpha = 3,93 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}.$$

Величина l_m в ур. (137) представляет среднюю длину проводника в м, z —число проводников, $2a$ —число параллельных ветвей обмотки и q —поперечное сечение проводника в мм².

Джоулевы потери, найденные для такого сопротивления, действительны лишь при прохождении постоянного тока через обмотку, в которой ток распределяется равномерно по поперечным сечениям проводов. Если же ток меняется во времени, то под действием изменяющегося при этом пазового поперечного поля в проводах будут индуцироваться вихревые токи, обуславливающие неравномерное распределение тока по поперечному сечению провода. Благодаря этому увеличиваются джоулевы потери в обмотке. Разность между джоулевыми потерями при переменном и при постоянном токе представляет собою добавочные джоулевы потери. Последние учитываются умножением омического сопротивления на соответствующий коэффициент сопротивления.

По проводам обмотки якоря постоянного тока также проходит переменный ток, так как после прохождения через короткое замыкание под щетками ток каждый раз меняет свое направление. Добавочные джоулевы потери возникают, следовательно, и в машине постоянного тока. Их величина определена Дрейфусом¹⁾.

Второй член ур. (136) представляет собою переходное сопротивление щеток. Переходное напряжение U_B от щеток к коллектору составляет около 1—2 вольт.

При определении коэффициента полезного действия машины следует к электрическим потерям причислить еще и джоулевы потери в регуляторах.

Магнитные потери возникают в тех частях машины, в которых индукция во время эксплуатации периодически колеблется. Во время работы машины постоянного тока распределение потока в пространстве неподвижно. Каждая частица движущегося якоря будет поэтому, в соответствии с распределением потока, подвергаться влиянию периодических колебаний индукции. Благодаря этому в железе якоря возникает два вида потерь: потери на гистерезис и на вихревые токи.

Потери на гистерезис представляют собою работу, необходимую для перемагничивания отдельных железных частиц. По эмпирической формуле, найденной Штейнметцем (Steinmetz), потери на гистерезис для единицы объема составляют:

$$v_H = \eta \cdot f \cdot B^{1,6} \cdot 10^{-7} \text{ ватт/см}^3 \dots \dots \dots (139)$$

Оказалось однако, что для больших индукций и при принимаемых в настоящее время сортах листового железа эта формула неточна. При

¹⁾ L. Dreyfus. Zusätzliche kommutierungsverluste bei Gleichstrommaschinen. Elektrotechnik und Maschinenbau, 1914, S. 281, Theorie der zusätzlichen Kommutierungsverluste bei Gleichstrommaschinen. Archiv für Elektrotechnik 3, 273, 1915.

индукция, обычно принимаемых для электрических машин, можно потери на гистерезис на один кг железа получить из следующего уравнения¹⁾:

$$W_H = \varepsilon \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \text{ ватт/кг} \dots \dots \dots (140)$$

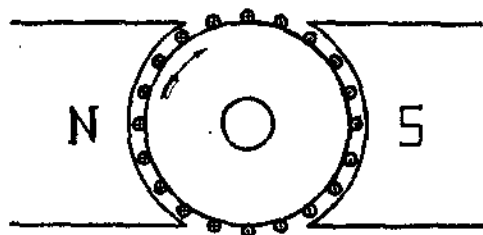
где ε — постоянная материала.

Для обыкновенного динамного железа толщиной в 0,5 мм величина $\varepsilon = 4,4$. Добавлением кремния можно уменьшить потери в железе. Для так называемого высоколегированного железа $\varepsilon = 3,0$. Частоту f перемагничивания легко определить непосредственно из числа пар полюсов p и числа оборотов в минуту n :

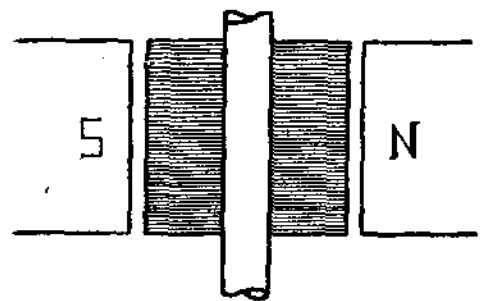
$$f = \frac{pn}{60} \dots \dots \dots (141)$$

Для величины B в ур. (140) следует принять максимальное во времени значение индукции в данном месте.

Потери от вихревых токов являются, собственно говоря, джоулевыми потерями. Благодаря изменению магнитного потока в железе якоря, так же как и в проводах обмотки, индуктируются ЭДС, вызывающие токи (вихревые токи), соответствующие сопротивлению железа (фиг. 80). На вихревые токи расходуется энергия, которая не может быть использована. Поэтому стараются их по возможности уменьшить. Это достигается тем, что железо якоря делится в направлении, перпендикулярном к активным проводам (следовательно, по направлению индуктированной ЭДС), на тонкие листы, изолированные друг от друга прослойками лака или наклеенной на них бумагой (фиг. 81). Величина индуктированной ЭДС пропорциональна активной длине проводника по направлению этой ЭДС. Толщина листов представляет собою активную длину проводника. При разделении



Фиг. 80. Вихревые токи в массивном теле якоря.



Фиг. 81. Якорь, собранный из листов.

якоря на очень тонкие листы индуктированная ЭДС в железе якоря, а тем самым и пропорциональные ей вихревые токи, будут небольшими. Потери от вихревых токов пропорциональны квадрату силы тока, а следовательно, и квадрату толщины листа. Железо, содержащее кремний, имеет омическое сопротивление большее, чем обыкновенное и динамное железо; при одинаковых ЭДС в высоколегированном железе вихревые токи, а следовательно, и потери, будут меньше.

¹⁾ R. Richter. Vorschlag zur Darstellung der Hysteresiswärme. Elektrot. Ztschr. 1903, S. 341.

Штейнметцом дана также формула для подсчета потерь на вихревые токи ¹⁾.

Для обыкновенной жести она гласит:

$$v_w = 1,6 \delta_{\text{см}}^2 \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot 10^{-8} \text{ ватт/дм}^2 \dots \dots \dots (142)$$

Для практических расчетов целесообразно относить потери на вихревые токи к 1 кг и в „постоянную материала“ ввести также толщину листов:

$$v_w = \sigma \left(\frac{f}{100} \cdot \frac{B}{10\,000} \right)^2 \text{ ватт/кг} \dots \dots \dots (143)$$

Здесь для обыкновенного динамного железа толщиной в 0,5 мм $\sigma=5,6$, а для высоколегированного железа той же толщины $\sigma=1,2^2$).

Так как потери на вихревые токи зависят, так же как и потери на гистерезис, от объема железа и от индукции, то эти два вида потерь объединяют под общим названием потерь на перемагничивание. Из ур. (140) и (143) мы получаем:

$$v = \left[\varepsilon \frac{f}{100} + \sigma \left(\frac{f}{100} \right)^2 \right] \left(\frac{B}{10\,000} \right)^2 \text{ ватт/кг} \dots \dots \dots (144)$$

Для суждения о динамном железе в отношении потерь в нормах Союза германских электротехников ³⁾ приводятся так называемые коэффициенты потерь. Последние дают потери на перемагничивание в ваттах, отнесенные к 1 кг железа при максимальных значениях индукции $B=10\,000$ и $B=15\,000$ CGS и при частоте в 50 периодов в секунду; при этом предполагается синусоидальное изменение индукции. Эти коэффициенты следующие:

	Толщина листа в мм	v_{10} в ватт/кг	v_{15} в ватт/кг
Обыкновенное динамное железо . . .	1,0	7,8	17,6
„ „ „ . . .	0,5	3,6	8,1
„ „ „ . . .	0,35	3,15	7,1
Высоколегированное железо	0,5	1,8	4,0
„ „ „	0,35	1,35	3,0

Наиболее употребительным сортом железа в электрических машинах является обыкновенное динамное железо толщиной в 0,5 мм, имеющее коэффициент потерь $v_{10}=3,6$ ватт/кг.

Индукция, являющаяся мерой потерь, будет иметь различную величину в различных местах якоря. Однако достаточно указать на две сильно намагниченные части: кольцевое тело якоря и зубцы якоря. Для определения удельных потерь в кольцевом теле якоря в ур. (144) подставляют среднюю индукцию B , подсчитанную ур. (54). Для подсчета потерь в зубцах якоря можно с достаточной точностью принять действительную

¹⁾ C. P. Steinmetz. Elektrot. Ztschr. 1892, стр. 43 ff; Theorie und Berechnung der Wechselstromerscheinungen, S. 143 ff.—G. Kapp. Dynamomaschinen. 4 Aufl. S. 105 ff Springer, Berlin 1904.—K. Pichelmayer. Dynamobau (Handbuch der Elektrotechnik. 5. 422. Hirzel, Leipzig, 1908).

²⁾ R. Richter. Elektrische Maschinen 1157. Springer, Berlin, 1924.

³⁾ VDE Prüfungsvorschriften für Eisenbleche. Selbstverlag des VDE.

индукцию в зубцах (ур. 65) для поперечного сечения, взятого на расстоянии $\frac{1}{3}$ высоты зубца над самым узким его сечением¹⁾.

Для определения названных потерь в железе якоря следует удельные потери, найденные из ур. (144), умножить на соответствующий вес железа. Последний определяется по удельному весу железа ($\gamma = 7,8 \text{ г/см}^3$), коэффициенту заполнения железа ($k_E = 0,9$ для жести толщиной в 0,5 мм) и по геометрическим размерам якоря. Таким образом, вес кольцевого тела якоря выразится:

$$\begin{aligned} P_A &= \gamma \cdot k_E \cdot \pi \cdot \left[\left(\frac{d}{2} - h_z \right)^2 - \left(\frac{d_i}{2} \right)^2 \right] l_e \cdot 10^{-3} = \left\{ \right. \\ &= 22 \left[\left(\frac{d}{2} - h_z \right)^2 - \left(\frac{d_i}{2} \right)^2 \right] \cdot l_e \cdot 10^{-3} \text{ кг,} \quad \left. \right\} \dots \dots (145) \end{aligned}$$

а вес зубцов якоря

$$\begin{aligned} P_z &= \gamma \cdot k_E \left[(d - h_z) \pi - N \cdot b_N \right] h_z \cdot l_e \cdot 10^{-3} = \left\{ \right. \\ &= 7 \left[(d - h_z) \pi - N \cdot b_N \right] \cdot h_z \cdot l_e \cdot 10^{-3} \text{ кг,} \quad \left. \right\} \dots \dots (146) \end{aligned}$$

где d — диаметр якоря, d_i — внутренний диаметр кольцевого тела якоря, h_z — высота зубца, l_e — длина железа якоря, N — число пазов, b_N — ширина паза. Все геометрические размеры следует взять здесь в см.

В выполненных машинах потери в железе обычно больше потерь, подсчитанных по вышеприведенным формулам. Благодаря штамповке листов материал на краях закаляется, что увеличивает в нем потери на гистерезис. Однако, гораздо значительнее сказывается увеличение потерь от вихревых токов из-за последующей обработки паза. Неровности, возникающие в пазах при штамповке и сборке листов (составление пакетов и прессовка), должны быть удалены напильником и зубилом. Такая обработка ведет к образованию заусенцев, ведущих к частичному электрическому соединению отдельных листов. Необходимо поэтому сводить к минимуму последующую обработку, для чего стремятся к точной штамповке и тщательной сборке. Целесообразно через каждые 10—20 мм толщины пакета прокладывать более толстую бумажную прослойку, которая при обработке не так легко перекрывалась бы.

На величину потерь в железе влияет также и характер изменения индукции во времени. Значения потерь, получаемые при расчете, относятся к случаю синусоидального характера изменения индукции. Если изменение индукции во времени происходит по каким-либо другим функциям, то потери всегда увеличиваются благодаря увеличению потерь от вихревых токов. В машинах постоянного тока изменение индукции во времени отклоняется от синусоиды как при холостом ходе (фиг. 28), так и при нагрузке (фиг. 47), что, согласно вышесказанному, дает увеличение потерь в железе в сравнении с результатами расчета на потери.

Увеличение потерь в железе из-за обработки и формы кривой изменения индукции не поддается подсчету. Это увеличение учитывается опытным коэффициентом. В машинах постоянного тока действительные потери в железе приблизительно в два раза больше подсчитанных потерь. Для действительных потерь в железе якоря можно, следовательно, написать:

$$V_{A+Z} \approx 2(v_A \cdot P_A + v_Z \cdot P_Z) \text{ ватт} \dots \dots \dots (147)$$

где отдельные величины определяются из ур. (144), (145) и (146).

¹⁾ К Pichelmayr. *Dynamobau*. 5.423. Hirzel, Leipzig. 1908.—L. Dreyfus. *Feldverteilung und Wirbelstrombildung in Dynamoankern*. Archiv f. Elektrotechnik 4.99, 1915.—R. Rüdenberg. *Ueber die Induktionsverteilung und Verlustberechnung*. Elektrot. Ztschr. 1906, S. 109; *Energie der Wirbelströme*. Enke, Stuttgart 1908; *Berichtigung*. Elektrot. Ztschr. 1915, S. 22.—R. Richter. *Einfluss der ungleichmässigen Induktionsverteilung*. Elektrot. Ztschr. 1903, S. 710.

В ярме и полюсах поток постоянен; в их железе нет никаких потерь, а потому их части можно изготовлять из сплошного железа (чугуна или стального литья).

При якоре с пазами магнитная проводимость в воздушном зазоре под полюсными башмаками различна в зависимости от того, находится ли против данного места полюсного башмака зубец или паз (ср. также § 5). Соответственно этому не будет равномерным и распределение потока на поверхности полюсного башмака. Так как эта неравномерность вызвана пазами якоря, то при движении последнего в каждом месте неподвижной поверхности полюсного башмака будет возникать колебание потока, способствующее в свою очередь образованию вихревых токов, а тем самым и потерь в железе.

Обозначив через $B_{\max}$ —индукцию против зубца и через $B_{\min}$ —индукцию против паза, мы получим амплитуду колебания индукции:

$$B_0 = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{2} \dots \dots \dots (148)$$

и частоту колебаний

$$f = \frac{N \cdot n}{60}, \dots \dots \dots (149)$$

последняя бывает порядка приблизительно в 1000 пер./сек.

Чем меньше пазов, тем меньше частота колебаний; однако при небольших частотах неравномерность поля проникает глубже в полюсный башмак. Отношение ширины воздушного зазора к ширине паза должно быть взято возможно большим, так как при этом уменьшается B_0 (§ 5). Для уничтожения вихревых токов полюсные башмаки в машинах постоянного тока выполняются из листов (ради большей простоты устройства часто выполняют из листов весь полюс вместе с башмаком). Поверхность полюсного башмака после сборки ни в коем случае не должна подвергнуться обработке, ибо в противном случае пропадает все преимущество разделения на прослойки.

Удельные потери на поверхности полюсных башмаков, отнесенные к 1 м² поверхности, можно определить из следующего уравнения¹⁾:

$$v_0 = k_0 \left(\frac{N \cdot n}{10\,000} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{B_0 \cdot t}{1\,000} \right)^2 \text{ ватт/м}^2, \dots \dots \dots (150)$$

где N —число пазов, n —число оборотов в минуту; B_0 —амплитуда колебания индукции из ур. (148); t —пазовое деление в см; k_0 —множитель, зависящий от магнитной и электрической проводимостей материала полюсного башмака. Принимают приблизительно:

- для массивных полюсных башмаков из ковкого железа $k_0 = 23,3$
- „ массивных полюсных башмаков из чугуна . $k_0 = 17,5$
- „ полюсных башмаков из листов толщиной в 2 мм $k_0 = 8,6$
- „ полюсных башмаков из листов толщиной в 0,55 мм $k_0 = 2,8$.

Суммарные потери на поверхности полюсного башмака составляют:

$$V_0 \approx 2p \cdot v_0 \cdot b_1 \cdot l_p \text{ ватт}, \dots \dots \dots (151)$$

¹⁾ R. Picou. Wirbelstromverluste in Polschuhen. L'industrie Electrique 1901. S. 493.—
R. Rüdenberg. Wirbelstromverluste in massiven Polschuhen. Elektrot. Ztschr. 1905, S. 181.—
R. Richter. Elektrische Maschinen 1.216. Springer, Berlin, 1924.

где $2p$ — число полюсов, v_0 — удельные потери на поверхности полюсного башмака из ур. (150), b_i — расчетная полюсная дуга (§ 5), так как для действительной полюсной дуги величина B_0 непостоянна (из-за расширения воздушного зазора на концах полюсного башмака), l_p — осевая длина полюса.

Если V — сумма всех потерь, возникающих в машине, а N — мощность, отдаваемая машиной, то $N+V$ будет составлять мощность, воспринимаемую машиной. Машина, приводящая в движение генератор в N kW, должна быть рассчитана на $(N+V)$ kW. Точно также двигатель, отдающий N kW механической мощности, должен получать из сети $(N+V)$ kW электрической мощности. Отношение полезной мощности ко всей расходуемой

$$\eta = \frac{N}{N+V} \dots \dots \dots (152)$$

носит название коэффициента полезного действия электрической машины. Он обычно колеблется между 85% и 95%. Технически возможно выполнить машины с еще лучшим коэффициентом полезного действия, однако это потребовало бы лишних расходов на материал. Последние экономически не всегда оправдываются улучшением коэффициента полезного действия. Методы измерения коэффициента полезного действия изложены в §§ 53—64 Норм Союза германских электротехников (VDE)¹⁾.

Как уже сказано, суммарные потери энергии преобразуются в тепло. Поскольку это количество теплоты не отводится в окружающую среду путем излучения и теплопроводности, оно накапливается в машине и повышает ее температуру.

Разность между температурой машины и температурой окружающей среды носит название превышения температуры Θ . Чем больше это превышение, тем большие количества теплоты отдает машина в окружающую среду. При постоянных потерях, следовательно при постоянстве подводимого количества теплоты, машина должна достигнуть превышения температуры, при котором количество отдаваемой теплоты равно количеству теплоты воспринимаемой.

Процессы при нагревании машины поддаются математическому анализу в том случае, если предположить, что последняя представляет собою однородное тело и если пренебречь потерей теплоты внутри самой машины.

Обозначим: Qdt — количество энергии в ваттах, превращенное благодаря потерям в теплоту за время dt ; Θ — превышение температуры машины в °C к моменту t ; A — коэффициент теплоотдачи машины в ваттах/°C; $A \cdot \Theta \cdot dt$ — количество теплоты, отданное в окружающую среду за время dt при превышении температуры Θ ; C — теплоемкость машины в джоулях/°C; $Cd\Theta$ — количество теплоты, накопленное в машине при превышении температуры $d\Theta$; величины Q , A и C здесь принимаются постоянными. Мы можем тогда написать дифференциальное уравнение для процесса нагревания в следующем виде²⁾:

$$Qdt = A \cdot \Theta \cdot dt + C \cdot d\Theta \dots \dots \dots (153)$$

Интегрируя и подставляя постоянные интегрирования (для $t=0$), мы получаем:

$$t = \frac{C}{A} \lg n \frac{Q - A \cdot \Theta_0}{Q - A \cdot \Theta} \dots \dots \dots (154)$$

или

$$\Theta = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{A}{C} \cdot t} \right) + \Theta_0 \cdot e^{-\frac{A}{C} \cdot t} \text{ градусов Цельсия} \dots \dots (155)$$

¹⁾ REM, 1923. Selbstverlag des Verbandes Deutscher Elektrotechniker.

²⁾ A. Schwaiger. Elektromotorische Betriebe, Sammlung Götschen 827. 34 ff, 1922.

Здесь e — основание натуральных логарифмов; θ_0 — начальное превышение температуры, так как для $t=0$ мы имеем $\theta=\theta_0$.

Если при $t=0$ машина имеет температуру окружающей среды, то $\theta_0=0$ и ур. (155) для процесса нагревания будет гласить:

$$\theta = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{A}{C}t} \right) \text{ градусов Цельсия} \dots \dots \dots (156)$$

Для $t=\infty$ мы имеем $\theta=\theta_{\max}=\frac{Q}{A}$; эта величина представляет собою конечное превышение температуры, достигаемое машиной лишь после бесконечно долгого времени, при чем величина начального превышения температуры безразлична, так как такой же результат мы получаем и из ур. (155).

Конечное превышение температуры зависит от отношения количества тепловых потерь к коэффициенту теплоотдачи. С возрастанием нагрузки возрастают тепловые потери, а тем самым, при постоянном коэффициенте теплоотдачи, и конечное превышение температуры машины. Учитывая свойства изоляции, не следует допускать в машине больших температур, превышающих сумму температуры окружающей среды и конечной температуры. Такие максимальные температуры найдены на основе практических испытаний и приводятся в § 39 норм V. D. E.¹⁾ Этим самым определяется, следовательно, предел мощности электрической машины²⁾.

Если температура окружающей среды на месте установки машины ожидается особенно высокой, то мощность следует понизить настолько, чтобы конечное превышение температуры, соответствующее потерям, уменьшилось на такую же величину, на какую увеличилась температура окружающей среды, ибо только при таком условии не будет превзойдена допустимая максимальная температура.

Способность к теплоотдаче зависит, главным образом, от величины и формы охлаждающих поверхностей, а также от количества охлаждающего воздуха и способа пропускания последнего через машину³⁾.

Искусственно увеличив поверхность охлаждения, можно достигнуть большей способности к теплоотдаче; в машинах постоянного тока делают якорь на ряд отдельных пакетов, приблизительно в 5 см толщины каждый, и между ними устраивают промежутки шириною около 1 см. При помощи осевых каналов в железных пакетах воздух подводится к этим промежуткам, а отсюда отбрасывается наружу в радиальном направлении. Повышением количества охлаждающего воздуха при помощи соответствующих вентиляторов можно увеличить способность к теплоотдаче; это дает возможность уменьшить размеры машины. Однако, здесь предел положен расходом мощности самих вентиляторов, так как увеличение количества охлаждающего воздуха ведет к ухудшению коэффициента полезного действия машины. Следует, кроме того, упомянуть, что на больших высотах

¹⁾ REM. 1923. Selbstverlag des Verbandes Deutscher Elektrotechniker. — W. Rogowsky. Ergänzung der Erwärmungsvorschriften. Archiv f. Elektrotechnik 7.41.1918. — M. Jakob. Die Temperaturverteilungen in elektrischen Wicklungen. Archiv f. Elektrotechnik 8.117.1919. — W. Rogowsky und V. Vieweg. Höchsttemperaturen in Spulen. Archiv f. Elektrotechnik 8.329.1919. — M. Jakob. Höchsttemperatur in Spulen. Archiv f. Elektrotechnik. 10.7.1921.

²⁾ W. Reichel. Vorläufige Grenzen im Elektromaschinenbau. Ztschr. d. Vereins Deutscher Ingenieure, 1920, S. 543.

³⁾ L. Binder. Wärmeübergang, Luftweg und Kühlung elektrischer Maschinen. W. Knappe, 1911. — K. Czeya. Entwicklung der Belüftungseinrichtungen elektrischer Maschinen. Elektrotechnische Zeitschrift 1912, S. 313. R. Pohl. Zur Wärmeberechnung elektrischer Maschinen. Archiv f. Elektrotechnik. 12.361.1923. — H. Gröber. Grundgesetze der Wärmeleitung und des Wärmeübergangs. Springer, Berlin, 1922.

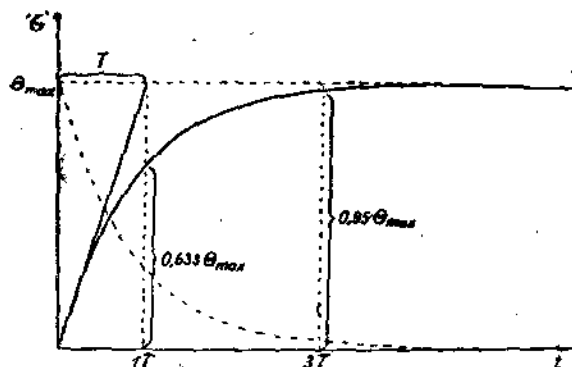
над уровнем моря способность к теплоотдаче ухудшается благодаря разрежению воздуха. Таким образом, конечное превышение температуры при одинаковых потерях будет больше при установке машины на значительной высоте над уровнем моря, чем при низком расположении установки. При установке машины на высоте 1 км над уровнем моря, мы можем выразить уменьшение способности к теплоотдаче следующей эмпирической формулой.

$$A_{\text{верхн.}} = A \left(1 - \frac{H-1}{10} \right) \dots \dots \dots (157)$$

Здесь $A_{\text{верхн.}}$ означает коэффициент теплоотдачи при установке машины на высоте H км над уровнем моря, тогда как A — коэффициент теплоотдачи на уровне моря. Соответственно уменьшению способности к тепло-

отдаче должна уменьшиться мощность, а тем самым и тепловые потери машины для того, чтобы не была превзойдена допустимая максимальная температура.

Нанеся графически из ур. (156) функцию $\theta = f(t)$, мы получим кривую нагревания, представленную на фиг. 82. Превышение температуры возрастает по показательной кривой $(1 - e^{-t/T})$ сначала очень быстро, а затем все медленнее. Для скорости возрастания температуры мерой является



Фиг. 82. Кривые нагревания и охлаждения.

отношение $\frac{C}{A}$ из ур. (156). Чем последнее больше, тем медленнее происходит нарастание. Так как отношение $\frac{C}{A}$ имеет размерность $\frac{\text{джоули} \cdot ^\circ\text{C}}{^\circ\text{C} \cdot \text{ватт}} = \text{сек.}$, то его можно назвать постоянной времени нагревания и обозначить буквой T . За время T была бы достигнута конечная температура при прямолинейном возрастании (следовательно, если теплоотдача равнялась бы нулю). Подставляя $\frac{C}{A} = T$ и $\frac{Q}{A} = \theta_{\text{max}}$ в ур. (156), мы получим:

$$\theta = \theta_{\text{max}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \text{ градусов Цельсия} \dots \dots \dots (158)$$

Мы видим, что при $t = T$ превышение температуры достигает 63,3% от своего конечного значения; при $t = 3T$ практически достигается конечное значение (95%). Постоянная времени средних машин составляет около 20 минут до 1 часа.

Выключая нагрузку при нагретой машине, мы будем иметь $Q \cdot dt = 0$; при этом благодаря теплоотдаче начнется процесс охлаждения. Дифференциальное уравнение процесса охлаждения мы получаем, подставляя в ур. (153) величину $Qdt = 0$:

$$A \cdot \theta \cdot dt + C \cdot d\theta = 0 \dots \dots \dots (159)$$

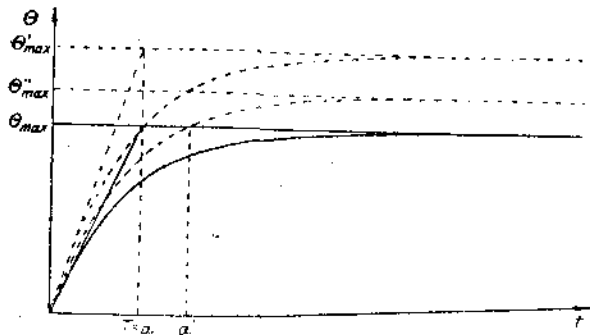
Интеграл этого выражения дает:

$$\theta = \theta_{\text{max}} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \dots \dots \dots (160)$$

если для $t=0$ принять $\theta=\theta_{\max}$. Сопоставление ур. (160) и ур. (158) показывает, что кривая охлаждения представляет собою зеркальное изображение кривой нагревания. На фиг. 82 кривая охлаждения начерчена пунктиром.

Очень часто встречаются двигатели, работающие в эксплуатации лишь под кратковременной нагрузкой, после которой каждый раз следует длительный перерыв (например, для передвижения кранов в гаванях, шлюзовые двигатели, двигатели для перевода стрелок и т. п.). Если длительность рабочего периода у них каждый раз значительно меньше, чем $3T$, то двигатели никогда не достигнут конечного превышения температуры, соответствующего длительной

работе. Если, например, рабочий период длится $a=T$, то двигатель достигнет лишь 63,3% от своей конечной температуры $\theta_{\max}$ при длительной работе. При кратковременной работе двигатель может быть, следовательно, так нагружен, чтобы его превышение температуры за рабочий период a было равно $\theta_{\max}$ (фиг. 83); таким образом в вышеприведенном примере мы имеем: $\theta'=\theta_{\max}'=0,633 \theta_{\max}$. Отноше-



Фиг. 83. Способность к перегрузке при кратковременной работе.

ние обоих конечных превышений температур дает способность к перегрузке p при кратковременной эксплуатации; в примере мы имеем

$$p = \frac{\theta_{\max}'}{\theta_{\max}} = \frac{1}{0,633} = 1,58\text{-кратную способность к перегрузке.}$$

Вообще говоря, способность к перегрузке p при кратковременной работе зависит лишь от постоянной машины T и от длительности рабочего периода a :

$$p = \frac{1}{1 - e^{-\frac{a}{T}}} \dots \dots \dots (161)$$

Разумеется, для этой способности к перегрузке за короткий период работы необходимо, чтобы перерыв после работы был достаточно велик для того, чтобы мотор успел охладиться до температуры окружающей среды.

В эксплуатации, наконец, встречаются и такие случаи, когда перерыв между двумя рабочими периодами не настолько велик, чтобы машина успела совершенно охладиться. Такая эксплуатация называется прерывистой (aussetzender Betrieb). При этом или периоды нагрузки регулярно чередуются с перерывами (например подъемники в горном деле), или же нагрузка колеблется во время работы (очень часто весьма продолжительной), а перерывы неодинаковы (например тяговые двигатели). Здесь нагревание и охлаждение должны быть исследованы по диаграмме нагрузки для ряда последовательных рабочих периодов, ибо только таким путем удастся определить максимальное нагревание, возникающее при эксплуатации. Лучше всего пользоваться при этом графическими методами¹⁾.

¹⁾ A. Schwaiger. Elektromotorische Betriebe, Sammlung Götschen. Bd. 827, 1922.—E. Oelschläger. Erwärmung bei Dauerbetrieb und aussetzendem Betriebe. Elektrotechnische Zeitschrift, 1900, S. 1058.—U. Knorr. Graphische Behandlung der Erwärmungsvorgänge. Elektrotechnische Zeitschrift, 1922, S. 1033.

§ 10. Схемы, характеристики и свойства при эксплуатации.

Как уже было показано в предыдущих параграфах, в машинах постоянного тока следует отличать две электрические цепи: цепь возбуждения и цепь якоря. Последние могут существовать в машине отдельно одна от другой, или же быть электрически связанными между собою. В зависимости от схемы соединения обеих цепей машина постоянного тока приобретает в эксплуатации ряд свойств, которые могут быть наглядно объяснены при помощи соответствующих характеристик. Характеристиками электрической машины называются кривые, изображающие зависимость двух эксплуатационных величин друг от друга, предполагая при этом, что все остальные эксплуатационные величины сохраняют постоянное значение. Однако, прежде чем перейти к рассмотрению эксплуатационных свойств машины постоянного тока при различных схемах соединений, остановимся еще раз в общих чертах на работе этой машины в качестве генератора или двигателя.

В генераторе механическая энергия превращается в электрическую, тогда как в двигателе, наоборот, электрическая энергия превращается в механическую. Разница между генератором и двигателем заключается, следовательно, только в направлении потока энергии. В то время как у генератора энергия подводится к валу машины и снимается с ее зажимов, у двигателя направление потока энергии обратное, а именно — от зажимов к валу машины. Было уже доказано (§ 1), что в машине постоянного тока во время работы, независимо от направления потока энергии (генератор или двигатель), всякий раз создается как электродвижущая сила благодаря движению проводов в поле, так и пондеромоторная сила токнесущего провода в поле. Пондеромоторная сила характеризует механическую сторону преобразователя энергии, а электродвижущая сила характеризует его электрическую сторону. Мощность, определяемая пондеромоторной силой (сила $\times$ плечо $\times$ угловая скорость), в любой момент равна мощности, определяемой электродвижущей силой ($\mathcal{E}$ $\times$ сила тока). По отношению к силам, действующим извне на машину, следует рассматривать внутренние силы в качестве сил противодействующих (противоэлектродвижущая сила, противодействующая пондеромоторная сила), которые или преодолевают внешние силы или преодолеваются последними. Обычно внутренняя сила одного вида энергии преодолевается в машине внешней силой того же вида энергии, тогда как внутренняя сила другого вида энергий сама преодолевает внешнюю силу последнего вида энергии; этим самым и определяется направление потока энергии. Критерием для этого направления является, следовательно, отношение обеих внешних сил, воздействующих на машину. Потери, возникающие в машине, обычно покрываются избытком внешней силы, дающей направление потоку энергии. Бывают случаи, когда часть потерь покрывается из постороннего источника энергии (потери на возбуждение при постороннем возбуждении; часть потерь от трения о воздух при посторонней вентиляции), или суммарные потери покрываются с обеих сторон преобразователя энергии (холостой ход машины, присоединенной к сети, если, например, машина-двигатель покрывает только потери на трение). В последнем случае вся подведенная энергия превращается в тепло; превращение энергии в том смысле, в каком это понималось выше, здесь не имеет места; на этом случае мы поэтому останавливаться не будем. Обычно потери в генераторе покрываются машиной-двигателем, а потери в моторе — электрической сетью.

Как уже сказано, передаваемая машиной внутренняя мощность равна или пондеромоторному моменту вращения $\times$ угловую скорость, или же

ЭДС $\times$ силу тока. Если оба множителя, дающие один вид мощности, имеют одинаковые знаки (+ или —), то мощность будет положительной, что по отношению к машине соответствует отдаче мощности; при различных же знаках мощность будет отрицательной, что означает расход или восприятие мощности. Так как внутренняя мощность полностью передается, то восприятию мощности одного вида будет соответствовать отдача мощности другого вида и наоборот. Внешние силы направлены противоположно внутренним; отдача мощности по отношению к машине будет, следовательно, соответствовать восприятию мощности внешней системой. На фиг. 84 представлены эти соотношения для генератора и для двигателя, а именно: а) для механической стороны машины (ременный шкив), б) для электрической стороны машины (электрическая цепь). Восприятие и отдача мощности здесь мыслятся по отношению к машине. На фиг. 84 означают: D — внутренний момент вращения, A — приводной момент вращения, L — момент вращения от нагрузки, ω — угловая скорость, U — напряжение у зажимов, E — ЭДС, I — сила тока¹⁾.

На фигуре мы имеем:

а) Механическая сторона.

Генератор: пондеромоторная сила действует против направления вращения (восприятие мощности).

Двигатель: пондеромоторная сила действует по направлению вращения (отдача мощности).

б) Электрическая сторона.

Генератор: ЭДС и ток одинаково направлены (отдача мощности).

Двигатель: ЭДС направлена противоположно силе тока (восприятие мощности).

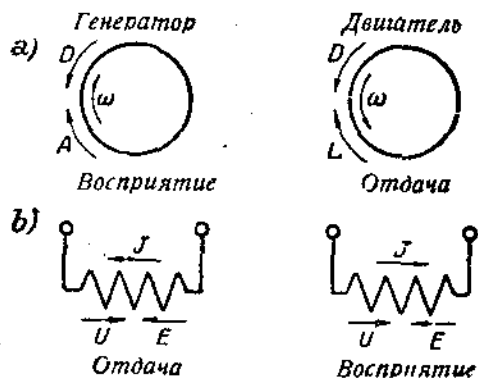
Приводной момент вращения A и внутренний момент вращения D

у генератора, или внутренний момент вращения D и момент вращения от нагрузки L у мотора отличаются на величину момента вращения от трения; последний преодолевается моментом, определяющим направление потока энергии, и имеет, следовательно, одинаковое направление с ω . Точно также напряжение у зажимов машины U отличается от ЭДС E на величину падения напряжения в машине; величина, имеющая одинаковое направление с I , должна покрывать падение напряжения; у генератора последнее будет покрываться, следовательно, ЭДС, а у мотора — напряжением у зажимов.

По устройству генератор постоянного тока ничем не отличается от двигателя постоянного тока. Одна и та же машина постоянного тока может работать как в качестве генератора, так и в качестве двигателя. Эта обратимость является существенным свойством электрических машин.

При переходе машины постоянного тока от работы генератором к работе в качестве двигателя или наоборот должен перемениться знак у мощности. Внутренняя мощность машины при подстановке из ур. (30а) будет равна

$$N_i = E \cdot I = k_1 \cdot n \cdot \Phi \cdot I, \dots \dots \dots (162)$$



Фиг. 84. Отдача и восприятие мощности машиной.

¹⁾ М. Schenkel, Elektrotechnik. 2. 109. ff. Weber, Leipzig, 1924.

где k , объединяет все постоянные величины, соответствующие данной машине, и входящие в ур. (30а). Как показывает ур. (162), у одного множителя или у всех трех переменных множителей должен перемениться знак для того, чтобы получился отрицательный знак для мощности.

В отношении вариантов со знаками возможны две группы:

а) Перемена направления работы имеет место в то время, когда машина остается приключенной к сети. Тогда величина E должна сохранить свой знак, так как она действует все время против напряжения сети; знак должен сохраниться, следовательно, и у произведения $n \cdot \Phi = -n \cdot \Phi$, тогда как величина I при перемене направления работы должна менять свой знак:

Случай	До перемены направления работы	После перемены направления работы	Например, при схеме соединения
1	$+n; +\Phi; +I$	$+n; +\Phi; -I$	Машина шунтового возбуждения
2	$+n; +\Phi; +I$	$-n; -\Phi; -I$	Машина последовательного возбуждения

б) При перемене направления работы присоединения сети к зажимам машины обмениваются местами. При этом изменяет свой знак величина E , а тем самым или n или Φ , тогда как I сохраняет свой знак:

Случай	До перемены направления работы	После перемены направления работы	Например, при схеме соединения
3	$+n; +\Phi; +I$	$+n; -\Phi; +I$	Машина шунтового возбуждения
4	$+n; +\Phi; +I$	$-n; +\Phi; +I$	Машина последовательного возбуждения

Из таблиц нетрудно выяснить, меняет ли или не меняет машина направление вращения после перемены направления работы. Для машины последовательного возбуждения характерно, что и I и Φ имеют всегда один и тот же знак (случай 2 и 4), перемена направления работы всегда, следовательно, связана с переменной направления вращения (для этого необходимо отключить обмотку якоря от обмотки полюсов и в одной из них переменить направление тока; см. ниже). У машины шунтового возбуждения после перемены направления работы Φ и I имеют различные знаки, если последние у них до этого были одинаковыми (случай 1 и 3); это происходит от того, что в шунтовых машинах знак перед Φ , независимо от характера работы (генератор или двигатель), зависит от напряжения сети, тогда как знак перед I при перемене направления работы меняется относительно напряжения сети; это дает возможность шунтовой машине при перемене направления работы сохранять направление вращения. Более подробно об отдельных схемах будет сказано ниже.

При перемене направления вращения (при неизменном характере работы в качестве генератора или двигателя), согласно ур. (162), должен меняться знак как перед n , так и перед Φ или перед I , так что знак перед внутренней мощностью остается неизменным. Следовательно, говоря практически, для перемены направления вращения ма-

шины постоянного тока необходимо переменить направление тока или в обмотке якоря, или в обмотке полюсов. Обычно принято изменять направления тока в якоре, так как при выключении тока в обмотках полюсов освобождаются большие количества магнитной энергии, затрудняющие выключение. Кроме того, возникает опасность, заключающаяся в том, что после переключения обмотки полюсов машина в качестве генератора не сможет возбуждаться, так как остаточный магнетизм, получающийся от прежнего направления тока, вызывает напряжение, стремящееся при новом направлении тока в обмотке полюсов уничтожить остаточный магнетизм.

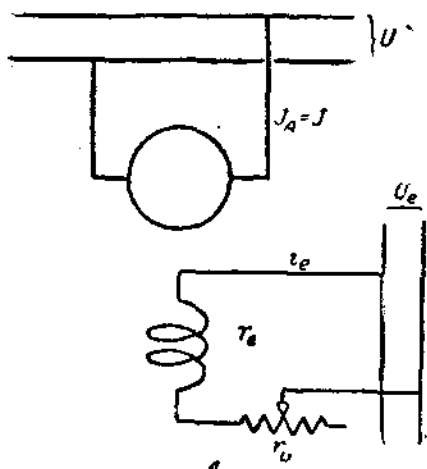
Самыми употребительными схемами соединения машин постоянного тока являются следующие:

1. Машина с посторонним возбуждением.

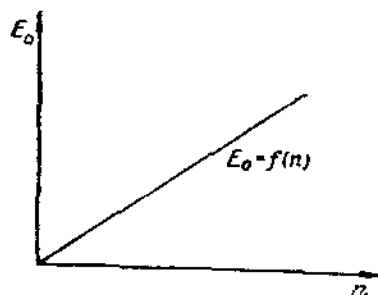
Особенность этой схемы та, что обмотка возбуждения питается от постороннего источника тока с постоянным напряжением, так что ток возбуждения совершенно не зависит от напряжения и тока в якоре (фиг. 85). При помощи регулирующего сопротивления r_e можно получить желательную величину тока возбуждения i_e , так как:

$$i_e = \frac{U_e}{r_e + r_a}, \quad \dots \quad (163)$$

где U_e — постоянное напряжение источника тока, питающего цепь возбуждения, и r_e — сопротивление обмотки возбуждения.



Фиг. 85. Машина с посторонним возбуждением.



Фиг. 86. Напряжение у зажимов при холостом ходе машины в функции от числа оборотов при постоянном возбуждении.

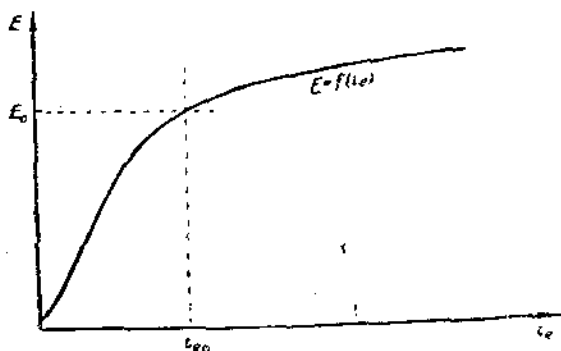
а) Генератор. Согласно ур. (30а), индуктированная ЭДС в генераторе постоянного тока равна:

$$E_0 = \frac{P}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot z \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \quad \dots \quad (164)$$

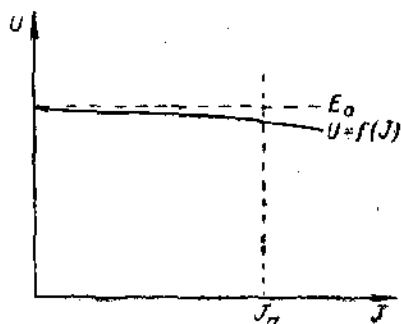
Если считать, что генератор отключен от сети, т.е. не нагружен, то напряжение, измеренное у зажимов, будет равно индуктированной ЭДС генератора (холостой ход). С изменением числа оборотов механического двигателя при постоянном возбуждении (Φ) генератора изменяется [согласно ур. (164)] пропорционально числу оборотов и напряжение у зажимов (фиг. 86). Если изменять ток возбуждения i_e при помощи регулирующих сопротивлений, то Φ благодаря насыщению магнитной цепи будет

изменяться не пропорционально i_e , а по некоторой кривой (фиг. 44), рассмотренной в § 5 в качестве магнитной характеристики машины. При постоянном числе оборотов машины величина E_0 пропорциональна Φ ; нанеся, таким образом, функцию $E_0=f(i_e)$ для постоянного числа оборотов, мы получим кривую (фиг. 87), отличающуюся от магнитной характеристики лишь на постоянный множитель. Такая кривая называется характеристикой холостого хода машины ($I_A=0$). При $i_e=0$ величина E_0 имеет некоторое небольшое значение, составляющее около 1—2% от номинального напряжения, что объясняется наличием остаточного магнетизма в полюсах. Характеристика холостого хода представляет собою изменение напряжения у зажимов, максимального для данного возбуждения. При прохождении через якоря некоторого тока нагрузки $I=I_A$ напряжение у зажимов станет на величину омического падения напряжения $I_A \cdot R_A$ меньше, чем при холостом ходе:

$$U = E_0 - I_A \cdot R_A \dots \dots \dots (165)$$



Фиг. 87. Характеристика холостого хода машины с посторонним возбуждением.



Фиг. 88. Внешняя характеристика машины с посторонним возбуждением.

Здесь следует учесть, кроме того, еще и падение напряжения из-за реакции якоря (§ 6).

Генераторы работают большей частью при токе возбуждения i_{e0} , при котором напряжение холостого хода E_0 лежит на колене характеристики холостого хода. Здесь железо близко к насыщению, так что реакция якоря становится незначительной (§ 6). Пренебрегая реакцией якоря, мы получаем из ур. (165) зависимость напряжения у зажимов от тока нагрузки $I=I_A$ (фиг. 88) при постоянном токе возбуждения ($i_e=\text{const}$) и постоянном числе оборотов ($n=\text{const}$). Разность между E_0 и U представляет собою падение напряжения. Кривая фиг. 88 дает внешнюю характеристику генератора с посторонним возбуждением; по этой характеристике можно судить о качестве машины в электрическом отношении (сопротивления, реакция якоря), тогда как характеристика холостого хода дает представление о работе машины в магнитном отношении.

Увеличением тока возбуждения можно достигнуть того, что и при нагрузке напряжение у зажимов будет постоянной величиной, равной напряжению холостого хода. Согласно нормам германских электротехников (REM § 69), должна быть возможность получить номинальное (рабочее) напряжение при номинальном числе оборотов для мощности в 1,25 раза большей, чем номинальная. Соответственно этому следует подсчитывать сопротивление обмотки возбуждения и регулирующих сопротивлений при заданном напряжении возбуждения.

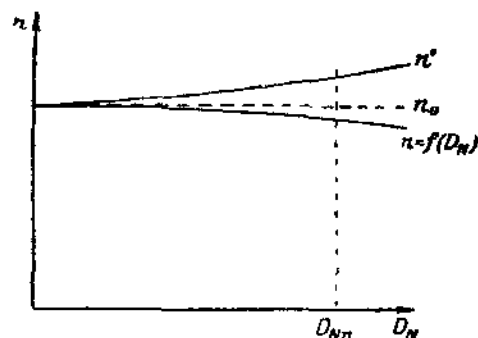
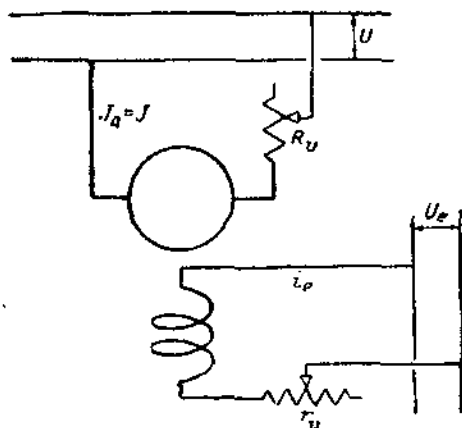
в) Двигатель. У двигателя падение напряжения в обмотке якоря покрывается напряжением сети (см. выше). Следовательно, противо-ЭДС, возникающая в двигателе, меньше напряжения сети на величину падения напряжения в обмотке якоря (а в известные моменты и в предельном сопротивлении R_a) (фиг. 89):

$$E_0 = U - I_A \cdot R_A \dots \dots \dots (166)$$

Согласно ур. (40) момент вращения, развиваемый в двигателе, равен

$$D = \frac{P}{a} \cdot \frac{z}{2\pi \cdot 9,81} \cdot I \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ кгм} \dots \dots \dots (167)$$

Полезный момент вращения D_N двигателя постоянного тока меньше, чем развиваемый двигателем момент вращения, на величину момента вращения холостого хода. Последний момент вращения служит для преодоления потерь от трения и в железе.



Фиг. 89. Двигатель с посторонним возбуждением.

Фиг. 90. Характеристика чисел оборотов.

Число оборотов двигателя можно вычислить из формулы ЭДС (ур. 164) при помощи ур. (166):

$$n = \frac{(U - I_A R_A) 60 \cdot 10^8}{z \frac{P}{a} \cdot \Phi} \text{ обор./мин.} \dots \dots \dots (168)$$

Оба эти уравнения (167) и (168) определяют характер работы двигателя постоянного тока.

При двигателе с посторонним возбуждением величина $\Phi = \text{const.}$ и момент вращения, согласно ур. (167), прямо пропорционален силе тока, т.е. последний устанавливается каждый раз соответственно требующемуся моменту вращения. Из ур. (168) видно, что ЭДС, а тем самым и число оборотов, с увеличением момента вращения (или тока в якоре) падают благодаря наличию омического падения напряжения. Характеристика числа оборотов (фиг. 90) очень сходна с нагрузочной характеристикой (фиг. 88), так как обе они пропорциональны разности между неизменяющимся напряжением и падением напряжения в якоре. Число оборотов n_0 для $D_N = 0$ называется числом оборотов холостого хода.

В приведенных выше рассуждениях не принята во внимание реакция якоря. Последняя ослабляет магнитный поток, что вызывает увеличение числа оборотов (n' на фиг. 90). В зависимости от того, сказывается ли сильнее реакция якоря или омическое падение напряжения, число оборотов

с увеличением момента вращения будет или увеличиваться, или уменьшаться. Оба эти случая представлены на фиг. 90 кривыми n' и n . Сравнивая обе кривые по отношению к постоянному моменту нагрузки $D_{\text{н}}$, мы можем установить следующее.

Кривая n : двигатель вращается с определенным числом оборотов, соответствующим точке пересечения кривой момента нагрузки (прямая $D_{\text{н}} = \text{const}$) и кривой числа оборотов [$n = f(D_{\text{н}})$]. Здесь момент вращения равен моменту от нагрузки. Если почему-либо число оборотов двигателя повысилось, то момент вращения его начинает падать (фиг. 90); здесь вступает в действие постоянный момент нагрузки, который и уменьшает число оборотов до прежней величины. При уменьшении числа оборотов перевес оказывается на стороне момента вращения двигателя, якорь получает ускорение, благодаря чему устанавливается первоначальное число оборотов. Работа двигателя здесь устойчива.

Кривая n' : при небольшом повышении числа оборотов момент вращения двигателя становится больше момента нагрузки, благодаря чему якорь получает ускорение вплоть до разноса. При уменьшении числа оборотов момент вращения двигателя становится меньше момента нагрузки и мотор останавливается. Работа двигателя здесь неустойчива. Поэтому следует избегать такой характеристики числа оборотов, как n' . Для этой цели увеличивают сопротивление цепи якоря для того, чтобы уменьшение ЭДС из-за омического падения напряжения влияло на изменение числа оборотов при нагрузке сильнее, чем уменьшение потока из-за реакции якоря. При этом способе однако увеличиваются омические потери двигателя. Экономически выгоднее поэтому соединить последовательно с обмоткой якоря несколько витков, намотанных на полюса; при этом ток якоря будет усиливать действие тока возбуждения. В этом случае каждой нагрузке будет соответствовать определенное усиление потока, что устраняет опасное ослабление поля, благодаря реакции якоря.

Следует отметить, что не всегда момент нагрузки не зависит от числа оборотов. В известных случаях (например, у вентиляторов) момент нагрузки сильно изменяется с изменением числа оборотов. Необходимо тогда кривую момента нагрузки в функции от числа оборотов представить наряду с характеристикой числа оборотов двигателя и исследовать, как и раньше для каждого отдельного случая, устойчивость работы при данных характеристиках.

Для того, чтобы по желанию изменять число оборотов, необходимо согласно ур. (168) или изменять приложенное напряжение или изменять величину потока Φ . Если двигатель присоединен к сети с постоянным напряжением, то напряжение у его зажимов может быть уменьшено лишь при поглощении соответствующей части напряжения сети в добавочном сопротивлении R_v (фиг. 89). Напряжение у зажимов этого сопротивления равно $I \cdot R_v$; соответственно этому напряжение у зажимов двигателя выразится:

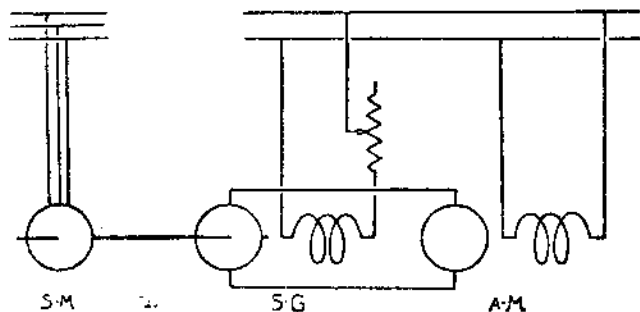
$$U' = U - I \cdot R_v \dots \dots \dots (169)$$

где U — постоянное напряжение сети. Омическое падение напряжения в якоре мало в сравнении с напряжением у зажимов, а потому, согласно ур. (168), число оборотов будет почти пропорционально напряжению у зажимов U' . Так как при помощи добавочного сопротивления можно достигнуть только уменьшения напряжения у зажимов, то такая регулировка осуществляет лишь уменьшение числа оборотов. В добавочном сопротивлении электрическая энергия в количестве $I^2 \cdot R_v = U_v \cdot I$ ватт превращается в теплоту. Пренебрегая потерями в двигателе, мы можем сказать, что отно-

шение электрической энергии, превращенной в двигателе в механическую работу, к электрической энергии, превращенной в добавочных сопротивлениях в теплоту, равно отношению соответствующих напряжений у зажимов. Например, при половинном числе оборотов напряжение у зажимов двигателя приблизительно равно половине напряжения сети; согласно ур. (169), половина напряжения сети должна, следовательно, расходоваться в добавочных сопротивлениях; при этом, как это видно из предыдущих рассуждений, в добавочном сопротивлении должно превратиться в теплоту приблизительно столько же энергии, сколько энергии превратится в двигателе в механическую работу. Пример показывает, что регулировка числа оборотов при помощи добавочного сопротивления, благодаря большим потерям, невыгодна в экономическом отношении и в особенности для больших изменений числа оборотов.

Экономически значительно выгоднее регулировка числа оборотов изменением потока. При помощи регулирующего сопротивления r , в цепи возбуждения можно изменять ток возбуждения i , а тем самым и поток Φ . Согласно ур. (168) число оборотов обратно пропорционально потоку. Уменьшая поток, можно, следовательно, увеличить число оборотов; предел для такого возрастания числа оборотов

предопределяется тем, что при одинаковых моментах вращения ур. (167) ток в якоре должен возрастать с уменьшением потока, благодаря чему в якоре возникает падение напряжения, понижающее число оборотов. Для уменьшения числа оборотов путем усиления поля предел предопределяется тем, что максимальный



Фиг. 91. Схема Леонарда.

ток возбуждения i , при выключенном регулирующем сопротивлении r , зависит от сопротивления обмотки возбуждения и не может быть больше определенной величины. Кроме того, благодаря насыщению железа в магнитной цепи, изменение потока становится ничтожным даже при значительных изменениях тока возбуждения. Поэтому для регулировки числа оборотов в сторону их уменьшения при постоянном напряжении сети применяют добавочное сопротивление в цепи якоря. Также и при пуске двигателей лишь в редких случаях обходятся без добавочных сопротивлений в цепи якоря¹⁾. При неподвижном двигателе в обмотке якоря не индуцируется никаких противоэлектродвижущих сил; если, следовательно, включить неподвижный двигатель на полное напряжение сети, то, благодаря незначительному омическому сопротивлению обмотки якоря, через нее потечет громадный ток; для ограничения последнего включают при пуске добавочное сопротивление в цепь якоря. При отключении двигателя необходимо следить за тем, чтобы сначала разрывалась цепь якоря, а лишь затем цепь возбуждения. Если бы сначала разомкнулась цепь возбуждения, а тем самым исчезло бы главное поле, то якорь воспринял бы значительный ток, так как противо-ЭДС больше создаваться не может.

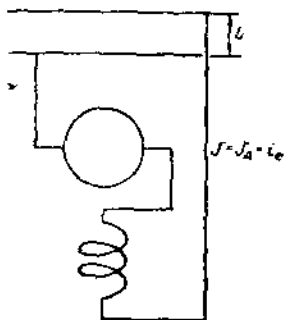
¹⁾ C. Trettin, Das Schalten grosser Gleichstrommotoren ohne Vorschaltwiderstand Elektrotechnische Zeitschrift 1912, S. 759.

В тех случаях, когда требуется частая регулировка мощных двигателей в широких пределах (подъемные машины в горном деле) и методы регулировки, приведенные выше (сопротивления в цепи якоря и магнитов), оказываются недостаточными и неэкономичными, весьма выгодно применять схему Леонарда (Leonard) (фиг. 91).

В этой схеме рабочий двигатель (А.-М.) с постоянным посторонним возбуждением питается от собственного генератора управления (S.-G.), приводимого в движение вспомогательным двигателем (S. M.) большей частью трехфазным с постоянным числом оборотов. Генератор управления имеет постороннее возбуждение; при помощи регулирующего сопротивления можно изменять ток возбуждения, а тем самым (фиг. 87) и напряжение генератора. Если пренебречь падением напряжения, то напряжение генератора будет равно напряжению двигателя, последнему напряжению ур. (168) при постоянном поле соответствует определенное число оборотов. Каждому положению регулятора цепи возбуждения генератора будет соответствовать определенное число оборотов двигателя, которое благодаря незначительным падениям напряжения будет слабо меняться при различных нагрузках. Здесь регулировка осуществляется в очень широких пределах и очень экономична в эксплуатации.

II. Машина последовательного возбуждения.

Машины последовательного возбуждения или сериесные машины являются машинами с самовозбуждением; в противоположность машинам с посторонним возбуждением, они сами создают свое поле и могут поэтому работать без постороннего источника тока. Особенность сериесной машины та, что в ней обмотки якоря и возбуждения соединены последовательно одна с другой (фиг. 92), благодаря чему через них проходит один и тот же ток ($I_A = i_e$). Из-за большого тока возбуждения при том же потоке (тех же ампер-витках в между полюсным пространстве), что и у машины с посторонним возбуждением, потребуется лишь незначительное число витков для обмотки возбуждения. По внешнему виду можно, следовательно, узнать сериесную машину из того, что обмотка ее полюсов состоит из немногих витков большого сечения.



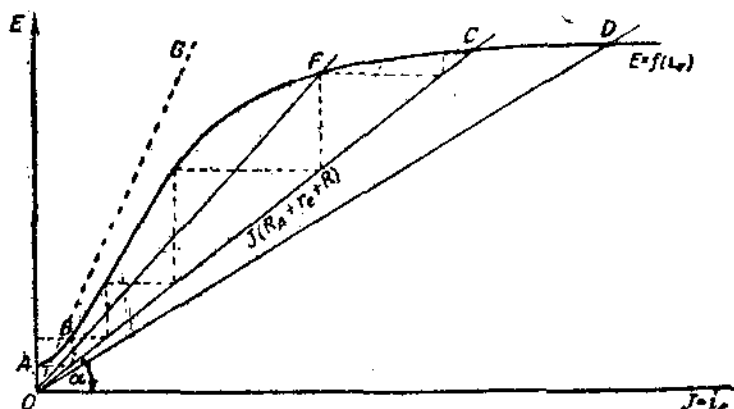
Фиг. 92. Машина последовательного возбуждения.

а) Генератор. При холостом ходе (при открытых зажимах) сериесного генератора в обмотке якоря индуктируется напряжение, соответствующее лишь остаточному магнетизму (около 1% до 2% от номинального напряжения), так как через обмотку возбуждения ток не проходит. Замыкая цепь через какое-либо сопротивление, потечет ток:

$$I = \frac{E_r}{R_A + r_e + R} \quad \dots \dots \dots (170)$$

где E_r — напряжение от остаточного магнетизма, R_A — сопротивление обмотки якоря, r_e — сопротивление обмотки возбуждения и R — сопротивление внешней цепи. Благодаря последовательному соединению все сопротивления складываются; знаменатель представляет собою, следовательно, суммарное сопротивление цепи. Ток I проходит через обмотку возбуждения и может усиливать или ослаблять остаточное поле в зависимости от направления последнего. Во втором случае остаточное поле пропадает и машина

ве может получить напряжения. Тогда необходимо или изменить направление вращения, или же обменять местами зажимы обмотки полюсов так, чтобы в последней изменилось направление тока и создавалось бы поле, усиливающее остаточное поле. Если в машине нет остаточного поля, то его следует восстановить; для этой цели обмотку полюсов на короткое время приключают к источнику постоянного тока (батарее). Благодаря усилению поля индуктируется большая ЭДС, вызывающая больший ток I . Последний в свою очередь усиливает поле. Индуктированная ЭДС в машине, таким образом, возрастает до определенной величины, зависящей от суммарного сопротивления цепи. Этот процесс называется самовозбуждением электрической машины; открытие его является заслугой Вернера Сименса ¹⁾ в 1866 г. Этот принцип в свое время дал толчок развитию электромашиностроения.



Фиг. 93. Процесс самовозбуждения.

Фиг. 93 дает наглядное представление о процессе самовозбуждения. Здесь $E=f(i_a)$ представляет собою магнитную характеристику машины при определенном числе оборотов. Эту характеристику можно получить для холостого хода при постороннем возбуждении (фиг. 87). Прямая OC изображает зависимость падения напряжения в цепи с определенным суммарным сопротивлением от силы тока I . По этой прямой можно для любой ЭДС (ординаты) получить соответствующую ей силу тока (абсциссу). В серийных машинах полный ток цепи проходит через обмотку полюсов; следовательно $i_a=I$. Из магнитной характеристики можно таким образом для любого тока в цепи I определить ЭДС. Допустим, что обмотки полюсов приключены правильно, так что индуцированный ток усиливает остаточный магнетизм. На фиг. 93 благодаря остаточному магнетизму индуцируется ЭДС A . Соответствующую ей силу тока в цепи мы получаем из прямой. Этот ток в качестве тока возбуждения создает поле, индуцирующее ЭДС B . По прямой снова находим ток при данной ЭДС и т. д. Для определенного тока I индуцированная ЭДС всегда больше, чем падение напряжения в цепи, чем обуславливается возрастание тока. Состояние неустойчиво до того момента, когда в точке C пересечения обеих кривых падение напряжения для тока I_c будет равно ЭДС, индуцированной при этом токе; здесь состояние будет устойчивым. При данном числе обо-

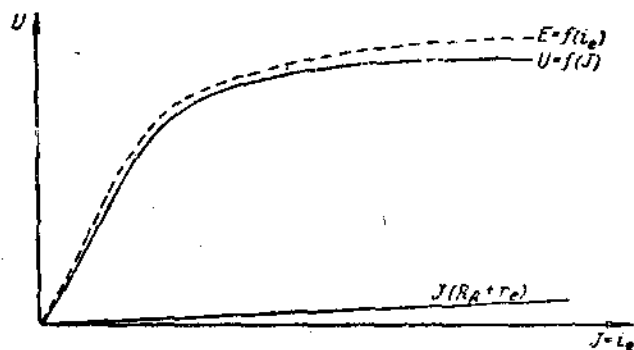
¹⁾ Werner Siemens. Wissenschaftliche und technische Arbeiten. 2; 234: см. также стр. 5 этой книги.

ротов и при сопротивлении цепи $R_A + r_e + R$ серийный генератор получит, следовательно, возбуждение, соответствующее ЭДС (C).

При определенном токе I ордината прямой OC пропорциональна сопротивлению цепи. Таким образом, угол наклона прямой ($\operatorname{tg} \alpha$) будет также мерой для суммарного сопротивления. Для меньшего суммарного сопротивления будет меньше и $\operatorname{tg} \alpha$ (прямая OD). Как видно из фиг. 93, в генераторе при этом индуцируется большая ЭДС (D). При большем сопротивлении (OF) индуцированная ЭДС (F) уменьшается. Если, наконец, суммарное сопротивление цепи настолько велико, что угол наклона прямой OG , изображающей падение напряжения, больше угла, образуемого прямолинейной частью магнитной характеристики, то в машине вообще не возникнет сколько-нибудь заметного напряжения; индуцированная ЭДС останется равной приблизительно ЭДС от остаточного поля. Суммарное сопротивление цепи серийного генератора не должно, следовательно, превосходить определенной величины заданной наклоном прямолинейной части

магнитной характеристики, в противном случае напряжение будет быстро падать.

Так как в серийном генераторе $I_A = I_e$, то магнитная характеристика изображает зависимость индуцированной ЭДС от тока нагрузки. Если пренебречь реакцией якоря, то внешнюю характеристику серийного генератора (фиг. 94) легко получить, вычитывая от



Фиг. 94. Внешняя характеристика серийного генератора.

магнитной характеристики падение напряжения внутри машины $I(R_A + r_e)$ для каждого тока. При большом внутреннем сопротивлении машины падение напряжения при большой силе тока становится настолько значительным, что в насыщенной части магнитной характеристики внешняя характеристика начинает падать по мере возрастания нагрузки.

Благодаря сильному колебанию напряжения у зажимов с изменением нагрузки серийный генератор постоянного тока на практике до сих пор не получил распространения¹⁾.

б) Двигатель. Согласно ур. (167) момент вращения двигателя пропорционален произведению из потока и силы тока в якоре. У серийного двигателя обмотки якоря и полюсов соединены между собою последовательно; через них, следовательно, проходит один и тот же ток. Изменению тока здесь соответствует и изменение потока, которое при ненасыщенном железе машины (прямолинейная характеристика $\Phi = c \cdot I$) пропорционально изменению тока. Для этого случая ур. (167) принимает вид:

$$D = C \cdot I^2, \quad \dots \quad (171)$$

где C — постоянная величина. Таким образом, момент вращения серийного двигателя возрастает пропорционально квадрату силы тока; с возра-

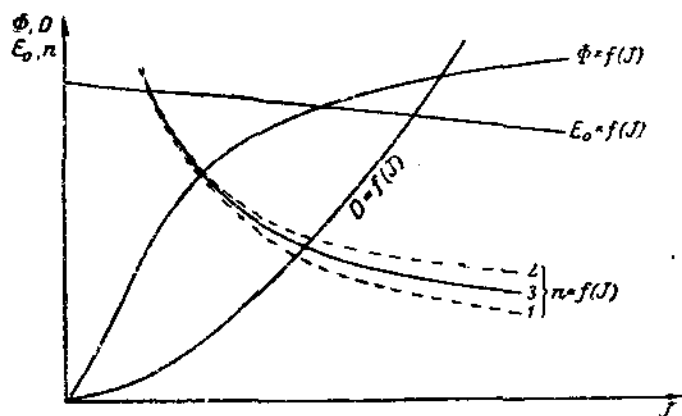
¹⁾ Принципиальной схемой серийного генератора все же пользуются, например, для электродинамического торможения составов в тяговом деле (см. ниже в тексте).

станием момента нагрузки ток будет возрастать, следовательно, лишь пропорционально квадратному корню из этого момента:

$$I = C \sqrt{D} \dots \dots \dots (172)$$

Это свойство является особенностью серийного двигателя; он пригоден поэтому для работы в таких отраслях, в которых возникают частые изменения нагрузки, как, например, в тяговых и крановых установках. Двигатель с посторонним возбуждением, благодаря своему постоянному полю, передавал бы в питающую сеть все колебания момента нагрузки в виде колебаний силы тока ур. (167), тогда как у серийного двигателя колебания тока смягчаются ур. (172) и питающая сеть предохраняется от толчков.

В действительности магнитная характеристика прямолинейна лишь при небольших токах возбуждения; с возрастанием насыщения железа, по мере увеличения тока возбуждения, магнитный поток увеличивается все



Фиг. 95. Момент вращения и число оборотов серийного двигателя.

меньше и меньше. Соответственно этому момент вращения будет возрастать пропорционально квадрату силы тока ур. (171) лишь при небольших нагрузках, тогда как при более значительных нагрузках [$\Phi = f(I) \approx \text{const}$] момент вращения будет изменяться, согласно ур. (167), приблизительно пропорционально силе тока (фиг. 95).

Из ур. (168) мы имеем:

$$n = C \frac{E_0}{\Phi} \dots \dots \dots (173)$$

При $E_0 = \text{const}$ и прямолинейной характеристике ($\Phi = c \cdot I$) получается

$$n = \frac{C'}{I} \dots \dots \dots (174)$$

(кривая 1 на фиг. 95). Так как при больших нагрузках благодаря насыщению железа поток Φ становится меньше, чем при прямолинейной характеристике, то n с увеличением силы тока не будет сильно падать, как при ненасыщенном железе (по гиперболе), а будет изменяться по кривой 2 (фиг. 95). Если учесть падение напряжения в машине [$E_0 = f(I)$ на фиг. 95] благодаря омическому сопротивлению, то E_0 , а тем самым и n , согласно ур. (173), с возрастанием тока будут падать несколько сильнее (кривая 3 на фиг. 95).

При помощи такого падения числа оборотов при возрастании нагрузки серийный двигатель „защищается“ от чрезмерной мощности. При постоянном числе оборотов (двигатель с посторонним возбуждением) мощность должна была бы возрасти пропорционально моменту вращения. Вместе с тем при постоянном напряжении у зажимов пропорционально моменту вращения должна была бы возрасти и сила тока. Благодаря падению числа оборотов уменьшается возрастание мощности и силы тока. Так, например, у кранового двигателя, поднимающего тяжелый предмет, установится меньшее число оборотов, благодаря чему будет расходоваться меньшая мощность, так как для той же работы здесь расходуется большее время.

В серийной машине поток Φ зависит только от силы тока, а не от напряжения. Поэтому и при колебаниях напряжения в питающей сети серийный двигатель будет требовать при постоянном моменте вращения одну и ту же силу тока. Однако число оборотов при колебании напряжения будет меняться, что видно из ур. (168). Если, например, в трамвайной сети из-за одновременных больших нагрузок возникает значительное падение напряжения, то трамвайные вагоны будут двигаться медленнее, но питаться будут при этом одним и тем же током из сети.

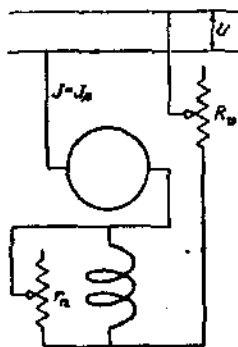
При незначительных нагрузках число оборотов серийного двигателя сильно возрастает; при этом центробежные силы могут возрасти настолько, что подвергнут двигатель опасности разброса. Поэтому с серийных двигателей не следует полностью снимать нагрузку. Если они не имеют достаточной постоянной нагрузки (такой, как, например, у тяговых двигателей), то для предохранения их от разброса следует защитить их автоматическими выключателями.

Регулировку числа оборотов серийного двигателя можно производить, как и у двигателя с посторонним возбуждением, при помощи добавочных сопротивлений R_a в главной цепи; такие сопротивления

необходимы прежде всего для пуска в ход. Более экономично, однако, регулирование при помощи сопротивления r_a , присоединенного параллельно к обмотке возбуждения (фиг. 96)¹⁾. Чем меньше это шунтовое сопротивление, тем большая часть главного тока в нем ответвляется, благодаря чему ослабляется ток в обмотке возбуждения, а следовательно, и магнитный поток.

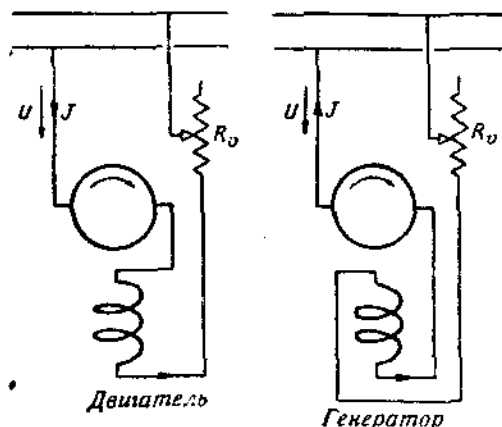
Если должна иметь место перемена направления работы (например двигатель должен работать в качестве генератора), то при том же напряжении у зажимов должно измениться направление тока в якоре; при той же схеме из этого вытекает изменение направления тока в обмотке возбуждения, а тем самым и направление поля машины.

¹⁾ Автор, говоря о большей экономичности, этим самым, однако, не хочет сказать, что шунтирующее сопротивление и сопротивление в главной цепи могут служить для одной и той же цели. Дело в том, что при одном и том же моменте от нагрузки сопротивлением в главной цепи можно регулировать число оборотов только в сторону уменьшения последнего, тогда как шунтирующее сопротивление регулирует число оборотов только в сторону повышения последнего. Кроме того, применение шунтировки поля для увеличения числа оборотов целесообразно лишь там, где речь идет об относительно небольшом моменте нагрузки. Ослабляя поле при больших моментах нагрузки, мы этим самым значительно увеличиваем силу тока (так как $D = c \cdot \Phi \cdot I$, см в тексте), являющегося единственным критерием для нагрева машины. Отсюда вытекают и различные назначения обоих видов сопротивлений. Сопротивление в главной цепи применяется главным образом для уменьшения воспринимаемой двигателем мощности в данный момент путем уменьшения числа оборотов, а шунтирующее сопротивление служит для увеличения числа оборотов при наличии малого момента нагрузки.

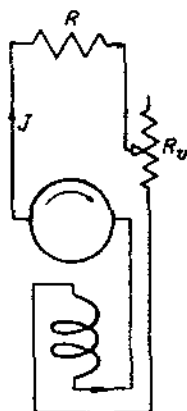


Фиг. 96. Серийный двигатель.

Это соответствует случаю 2 в § 10; здесь должно измениться направление вращения. В действительности же после направления работы машина не сможет самовозбудиться в качестве генератора, так как остаточный магнетизм создает поле в первоначальном направлении. Целесообразно поэтому переменить зажимы у обмотки возбуждения с тем, чтобы ток возбуждения при работе генератором проходил в том же направлении как и при работе двигателем. Согласно § 10, с этим связана перемена направления вращения, так что в конечном счете при переключенной обмотке



Фиг. 97. Изменение направления работы в серийной машине.



Фиг. 98. Торможение с сопротивлением в цепи машины.

возбуждения направление вращения машины при работе генератором будет такое же, как при работе двигателем (фиг. 97). Такая перемена направления работы на практике применяется при так называемом торможении с сопротивлениями (электродинамическое торможение). Если необходимо, например, затормозить трамвайный вагон, то его серийный двигатель отключают от сети и приключают к сопротивлению R , переключив при этом зажимы у обмотки возбуждения (фиг. 98). При том же направлении вращения машина будет самовозбуждаться и превращает энергию движения в электрическую энергию, превращаемую в сопротивлениях в теплоту¹⁾.

III. Машина шунтового возбуждения.

Шунтовая машина также самовозбуждается. В противоположность серийной машине обмотка возбуждения соединена здесь не последовательно с обмоткой якоря, а параллельно к ней, так что поле не создается током якоря (как в серийной машине), а зависит от напряжения на его зажимах (фиг. 99). При заданной мощности возбуждения, соответствующей его ампер-виткам, ток в цепи возбуждения шунтовой машины относительно мал (около $2 \div 5\%$ от тока в якоря), так как обмотка возбуждения присоединена к высокому напряжению у зажимов якоря. Поэтому внешними признаками, по которым можно отличить шунтовую машину, является большое число витков малого сечения у обмотки возбуждения. Шунтовая машина — самая распространенная машина постоянного тока.

¹⁾ Один из существенных недостатков этого способа торможения заключается в том, что по мере падения числа оборотов уменьшается индуктированная ЭДС, а вместе с этим и сила тока, благодаря чему к концу торможения эффект последнего значительно ослабляется.

а) Генератор. Ток, созданный в якоре шунтового генератора, должен питать две параллельные цепи: внешнюю цепь нагрузки и цепь возбуждения.

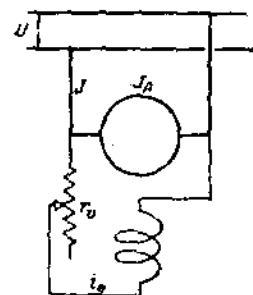
Таким образом, мы имеем:

$$I_A = I + i_e \dots \dots \dots (175)$$

При холостом ходе $I = 0$ и следовательно $I_A = i_e$. Машина работает в качестве сериесного генератора с сопротивлением нагрузки $R = 0$. Машина будет и в данном случае самовозбуждаться и достигнет устойчивого состояния лишь тогда, когда падение напряжения в цепи при токе i_e будет равно ЭДС, индуктированной этим током возбуждения (см. п. 1, § 10):

$$i_e (R_A + r_e + r_c) = E_0 \dots \dots \dots (176)$$

Для того чтобы самовозбуждение оказалось возможным, остаточный магнетизм и здесь должен, при данном направлении вращения, создавать поле определенного направления.



Фиг. 99. Шунтовая машина.

Суммарное сопротивление $(R_A + r_e + r_c)$ не должно быть слишком велико для того, чтобы прямая сопротивлений пересекала магнитную характеристику. Напряжение машины при холостом ходе равно

$$U = E_0 - i_e R_A = i_e (r_e + r_c), \dots (177)$$

оно, следовательно, меньше индуктированной ЭДС на величину падения напряжения в цепи якоря и равно падению напряжения в обмотке возбуждения.

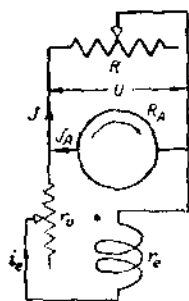
Если к зажимам шунтового генератора приключить сопротивление нагрузки R (фиг. 100), то по внешней цепи потечет ток I . Тогда мы имеем:

$$U = E_0 - I_A \cdot R_A = E_0 - (I + i_e) R_A = I \cdot R = i_e (r_e + r_c), \dots \dots (178)$$

Отсюда мы видим, что с возрастанием нагрузки напряжение у зажимов должно падать, при чем больше, чем у генератора с посторонним возбуждением [ур. (165)], так как здесь ток возбуждения не постоянен, а падает при постоянном сопротивлении r_c с уменьшением напряжения U .

При уменьшении сопротивления нагрузки R внешний ток I сначала возрастает до тех пор, пока при определенном R он не достигает своего максимального значения; при дальнейшем уменьшении сопротивления нагрузки ток I уменьшается, так как тогда уменьшение U значительнее, чем уменьшение R . Максимальное значение силы тока достигается тогда, когда индуктированная ЭДС падает до величины, лежащей приблизительно на колене магнитной характеристики, так как, начиная с этого момента, индуктированная ЭДС, а тем самым и напряжение у зажимов очень быстро уменьшаются.

Внешнюю характеристику шунтового генератора можно определить из ур. (178). Из этого уравнения следует, что состояние равновесия наступает каждый раз тогда, когда индуктированная ЭДС за вычетом падения напряжения (следовательно, напряжение у зажимов) равна при определенном токе возбуждения падению напряжения, вызванного этим током в обмотке возбуждения.

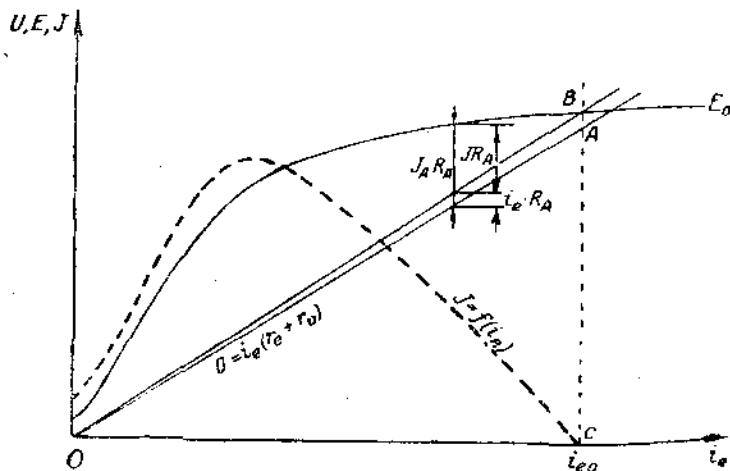


Фиг. 100. Шунтовой генератор, приключенный к сопротивлению

На фиг. 101 прямая OA изображает напряжение у зажимов U в функции от тока возбуждения i_e в предположении, что сумма $r_e + r_a$ постоянна [ур. 178]); E_0 — характеристика холостого хода. Для какого-либо тока возбуждения i_e разность ординат между характеристикой холостого хода и кривой OA представляет, согласно ур. (178), падение напряжения в якоре:

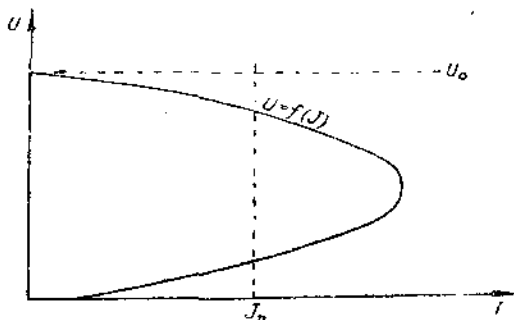
$$I_A \cdot R_A = (I + i_e) \cdot R_A.$$

При открытой внешней цепи нагрузки ($I = 0$) устанавливается ток возбуждения $OC = i_{e0}$, создающий ЭДС $BC = E_0$ и соответственное напряжение



Фиг. 101. Определение внешней характеристики шунтового генератора.

у зажимов $AC = U_0$. Отрезок BA изображает, таким образом, падение напряжения из-за тока возбуждения: $BA = i_{e0} \cdot R_A$. Если соединить O с B прямой линией, то разность ординат между OB и OA будет представлять собою падение напряжения $i_e \cdot R_A$ для данного тока возбуждения. Отсюда следует, что разность ординат между OB и кривой холостого хода дает падение напряжения $I \cdot R_A$, вызываемое в цепи якоря внешним током нагрузки I . Так как сопротивление якоря R_A является постоянной величиной, то эти разности ординат будут непосредственной мерой для тока I при различных токах возбуждения. На фиг. 101, кроме того, нанесена функция $I = f(i_e)$ при постоянном сопротивлении в цепи возбуждения $i_e \sim U$. Обменяв местами абсциссы и ординаты и проградуировав последние в единицах U вместо i_e , мы получим внешнюю характеристику $U = f(I)$ (фиг. 102), представляющую напряжение у зажимов в функции от тока нагрузки¹⁾.



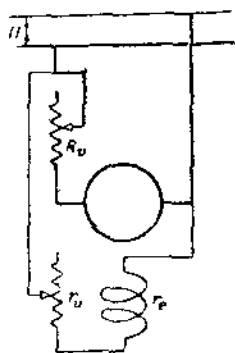
Фиг. 102. Внешняя характеристика шунтового генератора.

Падение напряжения $U_0 - U$ для номинального тока I_n при шунтовом генераторе будет несколько больше, чем при генераторе с посторонним

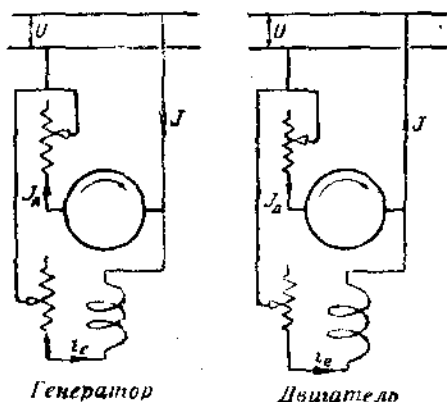
¹⁾ А. Thomälen. Kurzes Lehrbuch der Elektrotechnik, S. 167, 8 изд. Springer, Berlin, 1920.

возбуждением. Оно составляет около $2 \div 5\%$ от U . Сильно насытив железо в магнитной цепи машины, можно уменьшить падение напряжения, так как тогда ЭДС в насыщенной части магнитной характеристики колеблется лишь очень слабо при изменении тока возбуждения. Незначительное падение напряжения желательно у генераторов, питающих главным образом осветительные сети, так как колебание напряжения вызывает неприятное колебание силы света.

Большинство сетей требует постоянного напряжения. Шунтовой генератор является поэтому самым пригодным источником тока для сетей постоянного тока, так как он дает почти постоянное напряжение при встречающихся на практике нагрузках. Он пригоден также и для параллельной работы с другими шунтовыми генераторами.



Фиг. 103. Шунтовой двигатель.



Фиг. 104. Перемена направления работы в шунтовой машине.

Распределение нагрузки по отдельным генераторам осуществляется весьма просто при помощи регулятора в цепи возбуждения; если, например, желательно получить от генератора большую силу тока, то усиливают ток возбуждения, уменьшая для этого регулирующее сопротивление в цепи возбуждения; при этом усиливается поле, а тем самым индуктированная ЭДС.

Из уравнения:

$$U = E_0 - I_A \cdot R_A \dots \dots \dots (179)$$

мы видим, что при постоянном U увеличится и ток I_A , а тем самым изосданная электрическая мощность $E_0 \cdot I_A$. Так как механически подведенная мощность меньше, чем требующаяся электрическая мощность, то число оборотов несколько упадет. У механического двигателя регулятор при этом начнет увеличивать заполнение, благодаря чему мощность возрастет.

б) Двигатель. Обмотка возбуждения шунтового двигателя присоединяется непосредственно к постоянному напряжению сети (фиг. 103) (нельзя присоединять параллельно к якору обмотку возбуждения, последовательно соединенную с регулирующим сопротивлением R_v , так как благодаря этому поле при пуске будет сильно ослабляться). Таким образом, шунтовой двигатель не отличается от двигателя с посторонним возбуждением и обладает всеми свойствами последнего (§ 10 п. 1). Шунтовой двигатель вращается, следовательно, с почти постоянным числом оборотов (фиг. 90) при различных нагрузках. Благодаря таким свойствам он особенно пригоден для таких работ, как вращение станков, и т. п.

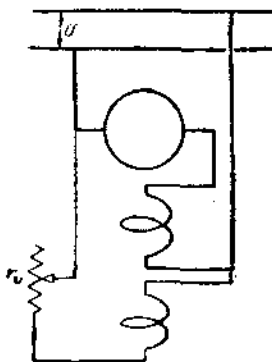
Шунтовая машина особенно пригодна для обратимой работы, так как здесь обмотка полюсов присоединена к постоянному напряжению сети, а потому как при работе генератором, так и при работе двигателем ток будет проходить в одном и том же направлении. При изменении направления работы меняет свое направление только ток в якоре. Это соответствует случаю 1 в § 10. Таким образом, при перемене направления работы шунтовая машина продолжает вращаться в том же направлении, что и раньше (фиг. 104). Отсюда видно, что шунтовая машина может переходить от работы в качестве генератора к работе в качестве двигателя или наоборот, не останавливаясь при этом (как в случае серийной машины), так как направление вращения остается неизменным. Изменение направления работы легко достигается при помощи шунтового регулятора. Например, при уменьшении возбуждения шунтовой машины, работающей в качестве генератора, будут падать также и поток и индуктированная ЭДС машины. У генератора индуктированная ЭДС больше напряжения сети и определяет направление тока в якоре; если же благодаря изменению возбуждения ЭДС упадет ниже величины напряжения сети, то направление тока в якоре изменится и машина начнет работать в качестве двигателя.

IV. Машина со смешанным возбуждением.

Машина со смешанным возбуждением или компаундная машина обладает, кроме полной шунтовой обмотки, еще и несколькими витками, последовательно соединенными с обмотками якоря (фиг. 105). Последние могут, в зависимости от схемы, или усиливать или ослаблять действие шунтовой обмотки.

а) Генератор. Как уже было сказано, у шунтового генератора при нагрузке появляется падение напряжения (фиг. 102). Если желательна почти постоянное напряжение и при нагрузке, то достигнуть этого можно при помощи нескольких витков, питаемых током якоря (серийных витков) и намотанных на магнитном полюсе для усиления действия шунтовой обмотки. Чем сильнее ток нагрузки, тем больше добавочное намагничивание, вызванное серийной обмоткой. При правильном расчете падение напряжения будет в точности уравниваться добавочным намагничиванием. В таких случаях говорят, что машина компаундирована (кривая I на фиг. 106). Если компаундирование недостаточно для уравнивания падения напряжения при нагрузке, то мы имеем дело с недокомпаундированием (кривая II, на фиг. 106). Часто бывает желательно, чтобы напряжение источника тока с увеличением нагрузки несколько возрастало; при этом падение напряжения в сети, пропорциональное току нагрузки, уравнивается, и напряжение у зажимов потребителей остается постоянным. Этого достигают усилением серийной обмотки, т.е. перекомпаундированием (кривая III на фиг. 106).

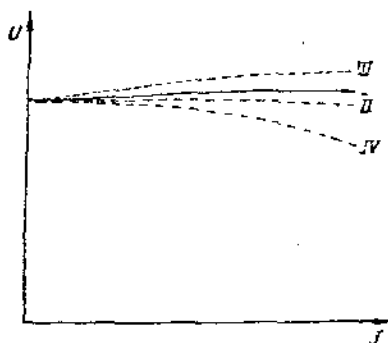
Компаундные генераторы употребляются для питания сетей, в которых часто возникают значительные колебания нагрузки, как, например, в железнодорожных сетях. Здесь напряжение невозможно поддерживать регулировкой тока возбуждения от руки или при помощи автоматических регуляторов. Поэтому здесь уместно автоматическое регулирование при помощи компаундирования.



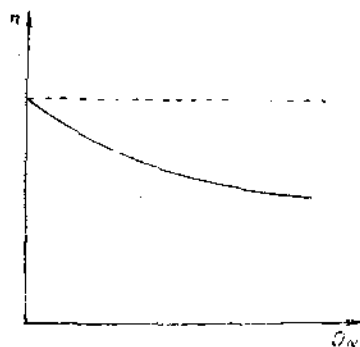
Фиг. 105. Компаундная машина.

Включив серийную обмотку так, чтобы ее поле ослабляло поле шунтовой обмотки (противокомпаундирование), мы получим падение напряжения еще большее, чем у шунтового генератора (кривая IV на фиг. 106).

б) Двигатель. У компаундных двигателей серийная обмотка большей частью включается так, что при нагрузке ее поле усиливает поле шунтовой обмотки (компаундирует последнюю). При противокомпаундиро-



Фиг. 106. Внешняя характеристика.



Фиг. 107. Характеристика числа оборотов компаундного двигателя.

вании с возрастанием нагрузки получилось бы ослабление поля, а следовательно, и увеличение числа оборотов; при этом в большинстве случаев исключается возможность устойчивой работы (§ 10, п. 1).

Компаундный двигатель не может „пойти в разнос“, так как при полной разгрузке (холостой ход) сохраняется еще постоянное поле шунтовой обмотки. С возрастанием нагрузки число оборотов падает из-за усиления поля, благодаря серийной обмотке. Характеристика числа оборотов (фиг. 107) дает в то же время представление о свойствах типов двигателей с соответствующими обмотками.

V. Особые источники постоянного тока.

а) Машина Розенберга ¹⁾.

Машина Розенберга служит для создания почти постоянной силы тока при переменном числе оборотов. Она применяется, например, для освещения поездов, при чем ее якорь непосредственно связан с вращающейся осью вагона. Желательно, чтобы освещение (следовательно и ток) при различных скоростях вагона (числе оборотов) колебалось возможно меньше. Схема машины Розенберга ясна из фиг. 108. Обмотка полюсов питается от постороннего источника под постоянным напряжением. Между полюсами вращается обыкновенный якорь машины постоянного тока. На фиг. 108, по двум concentрическим окружностям, представлены две отдельные обмотки, которые, однако, следует мыслить как положенные одна на другую, так как в действительности имеется налицо лишь одна обмотка. По коллектору скользят две пары щеток. Одна пара *bb* расположена, как в обычных машинах постоянного тока, в нейтральной зоне; эти щетки замкнуты между собою накоротко соединительным проводом. Ось второй пары щеток *BB* расположена перпендикулярно к оси первой пары щеток;

¹⁾ E. Rosenberg, Maschine für konstanten Strom. Elektrotechnische Zeitschrift, 1905, S. 393.

с этих щеток снимается необходимый ток I . Продольный поток Φ_l создает в цепи якоря (внутренняя цепь) силу тока I_q , замкнутого через щетки bb . Этот ток вызывает поперечный поток Φ_q (§ 6). Для того, чтобы облегчить возникновение последнего, полюсные башмаки в машине Розенберга устраиваются возможно более широкими. Поперечный поток Φ_q создает с своей стороны в обмотке (внешняя цепь) ток I , снимаемый со щеток BB . Из фиг. 108 следует, что ток I создает в машине продольное поле, противодействующее основному продольному полю возбуждения. Результирующий продольный поток Φ_l получается, следовательно, от разности созданных током I магнитодвижущих сил полюсов и якоря:

$$\Phi_l = \Lambda_l \cdot (C_1 - C_2 \cdot I), \dots \dots \dots (180)$$

где Λ_l —магнитная проводимость в продольном направлении, C_1 —постоянная магнитодвижущая сила полюсов и $C_2 \cdot I$ —магнитодвижущая сила якоря, пропорциональная силе тока. Продольный поток Φ_l должен быть незначительным, ибо в противном случае ЭДС, индуцированная этим потоком в обмотке якоря, вызовет большую силу тока в коротко-замкнутой цепи (bb). Сердечники полюсов могут поэтому обладать небольшим поперечным сечением. При числе оборотов n , мы имеем;

$$C_3 \cdot \Phi_l \cdot n = I_q R, \dots \dots (181)$$

где R —омическое сопротивление обмотки якоря; следовательно, $I_q \cdot R$ будет равно ЭДС, индуцированной продольным потоком Φ_l . Поперечный поток Φ_q , созданный током I_q , равен

$$\Phi_q = \Lambda_q \cdot C_2 \cdot I_q \dots \dots (182)$$

Следовательно, вместе с ур. 181 получится:

$$\Phi_l \cdot n = C_4 \cdot \Phi_q \cdot \frac{R}{\Lambda_q} \dots \dots (183)$$

ЭДС, индуцированная потоком Φ , расходуется на прохождение тока через цепь, состоящую из сопротивления якоря R и внешнего сопротивления R' :

$$C_3 \cdot \Phi_q \cdot n = I(R + R') \dots \dots \dots (184)$$

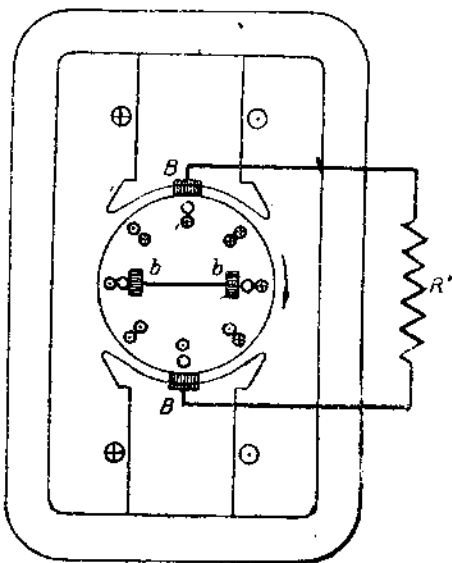
Следовательно, совместно с ур. (180) и (183) получится:

$$A_l (C_1 - C_2 \cdot I) \cdot n = C_5 \cdot \frac{I}{n} \cdot \frac{R(R + R')}{\Lambda_q} \dots \dots \dots (185)$$

или

$$I = \frac{C_1 \cdot n^2 \cdot \Lambda_l \cdot \Lambda_q}{C_2 \cdot n^2 \cdot \Lambda_l \cdot \Lambda_q + C_5 \cdot R \cdot (R + R')} \dots \dots \dots (186)$$

При возрастании числа оборотов перестает сказываться влияние второго члена в знаменателе в сравнении с первым членом, так что ток I вскоре начинает приближаться к величине почти не зависящей от числа оборотов (фиг. 109).



Фиг. 108. Машина Розенберга.

Если цепь нагрузки замкнута через постоянное сопротивление R_b , то после включения постороннего возбуждения напряжение у зажимов, а следовательно и ток нагрузки, будут возрастать; состояние — неустойчивое. С возрастанием нагрузки возрастает и противодействие серийной обмотки. Устойчивое состояние достигается в том случае, когда ток нагрузки I_b возрос в такой мере, что магнитодвижущая сила серийной обмотки равна и противоположна магнитодвижущей силе обмотки постороннего возбуждения:

$$i_r \cdot w_r = I_b \cdot w_s = i_f \cdot w_f \dots \dots \dots (187)$$

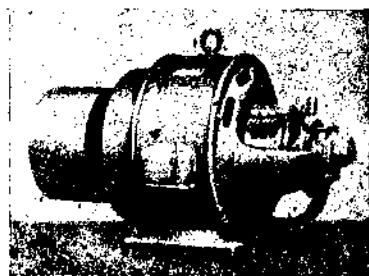
где w_r — число витков серийной обмотки, w_f — число витков обмотки постороннего возбуждения. Напряжение у зажимов равно (фиг. 111):

$$U = I_b \cdot R_b = BA = i_n \cdot r_n \dots \dots \dots (188)$$

а ток возбуждения в шунтовой обмотке $i_n = OB$. Состояние устойчивое. При незначительном изменении напряжения у зажимов, а тем самым (при постоянном сопротивлении нагрузки) и тока нагрузки будет брать верх или магнитодвижущая сила серийной обмотки, или магнитодвижущая сила обмотки постороннего возбуждения, благодаря чему напряжение у зажимов в любой момент приводится к первоначальному состоянию.

С уменьшением сопротивления нагрузки R_b ток при одинаковом напряжении у зажимов возрастает; магнитодвижущая сила серийной обмотки становится больше, чем постоянная магнитодвижущая сила обмотки с посторонним возбуждением. Под действием этой добавочной магнитодвижущей силы от противоположно-направленного возбуждения магнитодвижущая сила шунтового возбуждения ослабляется; напряжение у зажимов падает до тех пор, пока при новом меньшем сопротивлении нагрузки R_b' не установится первоначальный ток I_b (CD на фиг. 111). После этого серийная обмотка и обмотка постороннего возбуждения будут снова друг друга уравновешивать. Аналогичный процесс имеет место при увеличении R_b . При всех сопротивлениях нагрузки состояние будет лишь тогда устойчивым, когда ток I_b достигнет своего постоянного значения, заданного током постороннего возбуждения i_f , согласно ур. (187). Как это видно из ур. (187), изменением тока постороннего возбуждения i_f удастся установить другой рабочий ток, не зависящий от сопротивления нагрузки.

Условием для независимости тока нагрузки от внешнего сопротивления является, как уже сказано, прямолинейное изменение магнитной характеристики и совпадение наклона прямой сопротивления для цепи возбуждения с наклоном прямолинейной части характеристики; лишь в этом случае будет при любом напряжении у зажимов проходить через шунтовую обмотку ток возбуждения i_n , которого окажется достаточно для создания необходимого напряжения; добавочного возбуждения не требуется; действие постоянного тока постороннего возбуждения будет, следовательно, уничтожаться постоянным током в серийной обмотке. На фиг. 111 это действительно для напряжений у зажимов от O (короткое замыкание) до FG . При большем напряжении у зажимов возбуждения в шунтовой обмотке уже недостаточно для создания соответствующей ЭДС; требуется добавочное возбуждение, которое и доставляется обмоткой,

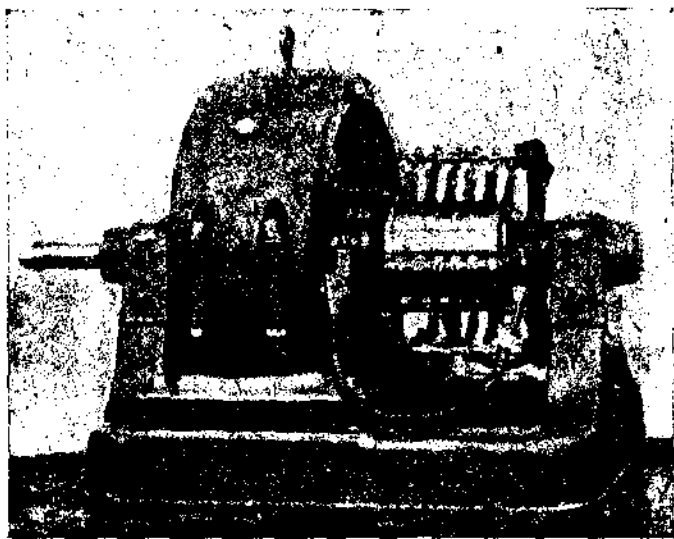


Фиг. 112. Двигатель постоянного тока 34 л. с. 500 об/мин. 110 вольт.

питаемой из постороннего источника. При помощи магнитодвижущей силы серийной обмотки должна компенсироваться некоторая меньшая доля магнитодвижущей обмотки постороннего возбуждения; поэтому при внешних сопротивлениях больших, чем то, которое соответствует напряжению FG , ток нагрузки больше не остается постоянным, а начинает падать. Если сопротивление внешней цепи становится бесконечно большим (холостой ход), то устанавливается напряжение у зажимов E_0 , соответствующее возбуждению $i_n + i_f$, при чем i_n — ток шунтового возбуждения при этом напряжении у зажимов и i_f — постоянный ток от постороннего возбуждения; последний в качестве добавочного возбуждения проявляется здесь полностью, так как ток в противодействующей серийной обмотке равен 0.

§ 11. Части конструкций.

В зависимости от своих размеров, машины постоянного тока выполняются или с подшипниками в щитах, или с подшипниками на стойках. В машинах средней мощности стойки отливаются вместе с фундаментной плитой (фиг. 113), в машинах же большой мощности они изготавливаются отдельно и прикрепляются к фундаментной плите болтами (фиг. 114).

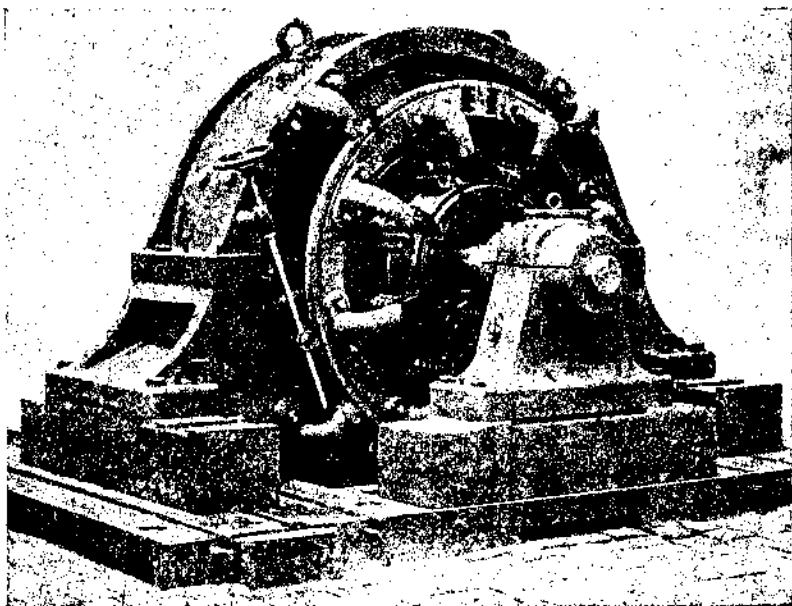


Фиг. 113. Генератор постоянного тока.

Железная кольцообразная станина машины постоянного тока (фиг. 115) представляет собою также и магнитное ярмо между полюсами. У малых машин (фиг. 113) ярмо изготавливается из чугуна, у больших машин — часто из стального литья. Чугун, правда, дешевле стального литья, но обладает зато значительно меньшей магнитной проводимостью и механической прочностью. Машины большой мощности пришлось бы поэтому выполнить из чугуна с значительно большим поперечным сечением, чем из стального литья, что делало бы их чрезвычайно тяжелыми.

Магнитные полюса штампуются из железных листов толщиной в 0,5—1,5 мм, при чем керн и башмак изготавливаются из одного куска. Отдельные листы собираются в пакеты, которым придается желательная

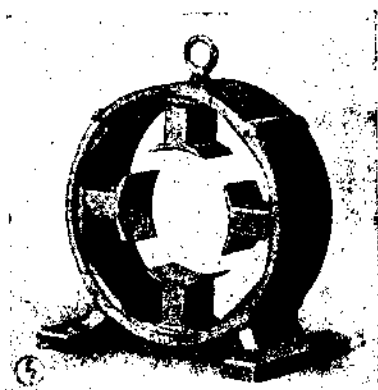
длина в осевом направлении; последние затем спрессовываются и укладываются между двумя более толстыми листами или плитами из стального литья, которые скрепляются заклепками (фиг. 115). В этих пакетах полюс-



Фиг. 114. Генератор постоянного тока фирмы Сименс-Шуккерт: 175 kW, 128 об/мин, 240 вольт.

ных листов в радиальном направлении просверливаются, в зависимости от размеров полюса, одно или несколько отверстий, в которых предусматривается нарезка. При помощи болтов, вводимых снаружи через магнитное ярмо, полюса прикрепляются к станине. На снимках головки этих болтов ясно видны на наружной поверхности станины.

Дополнительные полюса большей частью изготавливаются из ковкого железа. Лишь в тех случаях, когда ожидаются частые и сильные колебания тока в якоре, дополнительные полюса изготавливаются также из листов (фиг. 120; на фиг. 116 представлено несколько листов, сваренных между собою в отдельных точках; листы эти служат в качестве крайней плиты для дополнительного полюса, собранного из пластин). Благодаря этому дополнительное поле в состоянии быстро следовать за изменениями условий нагрузки и не замедляется в своих изменениях из-за наличия вихревых токов в сплошном керне дополнительного полюса. Дополнительные полюса прикрепляются к ярму так же, как и главные полюса, при помощи болтов. Между ярмом и керном большей частью предусматривают прокладки из железного листа (фиг. 115), число которых может быть изменено; это дает возможность покрыть неточности



Фиг. 115. Магнитная система машины постоянного тока.

в расчете обмотки путем изменения воздушного зазора. Обмотки главных и дополнительных полюсов имеют различные формы в зависимости от размеров предоставленного для их обмоток пространства, от числа витков полюса и величины проходящего через них тока или, что то же самое, поперечного сечения провода.



Фиг. 118. Сваренные между собою в отдельных точках крайние листы дополнительного полюса.

Поперечное сечение провода обмоток, питаемых током якоря I_A (дополнительные и главные полюса в серийных машинах), зависит от этого тока и от выбранной плотности тока i . Плотность тока ограничивается допустимым нагреванием. Пусть a — число параллельных ветвей обмотки, тогда:

$$q = \frac{I_A}{a \cdot i} \dots \dots \dots (189)$$

Число витков одного полюса подсчитывается из потребного числа ампер-витков для магнитной цепи:

$$w = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Theta}{a} \cdot \frac{I_A}{i} \dots \dots \dots (190)$$

Поперечное сечение проводов в серийных обмотках возбуждения бывает большей частью весьма значительно, так как оно определяется током якоря.

В обмотках, у которых ток возбуждения зависит от постоянного напряжения (машины с шунтовым и посторонним возбуждением), поперечное сечение провода определяется величиной этого напряжения U , ампер-витками Θ , потребными в междуполюсном пространстве, и средней длиной провода одного витка l_m . Согласно ур. (190), ток возбуждения i_e , при a параллельных ветвях равен:

$$i_e = a \cdot \frac{\Theta}{2w} \dots \dots \dots (191)$$

где w — число витков одного полюса. При числе полюсов, равном $2p$, суммарное сопротивление обмоток возбуждения равно

$$r_e = \rho \cdot \frac{2p \cdot w \cdot l_m}{a^2 \cdot q} \dots \dots \dots (192)$$

где ρ — удельное сопротивление меди. Так как напряжение определенное, то должно быть выполнено следующее условие:

$$U = i_e \cdot r_e \dots \dots \dots (193)$$

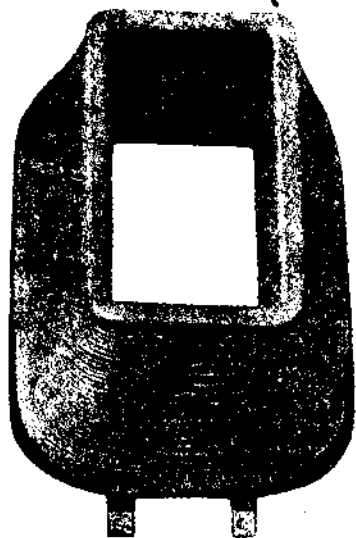
Из ур. (191), (192) и (193) получается поперечное сечение q обмотки возбуждения, а именно:

$$q = \rho \cdot \frac{p}{a} \cdot \frac{\Theta}{U} \cdot l_m \dots \dots \dots (194)$$

Поперечные сечения обмоток шунтового и постороннего возбуждения большей частью малы, так как U обычно велико.

При малых поперечных сечениях проводов употребляется витой двухжильный круглый провод, при больших сечениях — прямоугольный провод или шнур (жгут). Провод наматывается большей частью на каркас, склепанный из толстого железного листа и обложенный пресшпаном с таким расчетом, чтобы железо нигде не приходило в соприкосновение с обмоткой.

Намотанные готовые катушки пропитываются лаком (на фиг. 117 изображена обмотка главного полюса, а на фиг. 118 — обмотка дополнительного полюса на каркасе). В меньших машинах обмотка наматывается на каркасе, изготовленном из пресшпана. В этом случае все вместе плотно обматывается полотняной лентой и пропитывается (фиг. 119). Обмотка делится иногда, для целей лучшего охлаждения, также на отдельные пакеты, отделенные друг от друга колодками (фиг. 120).

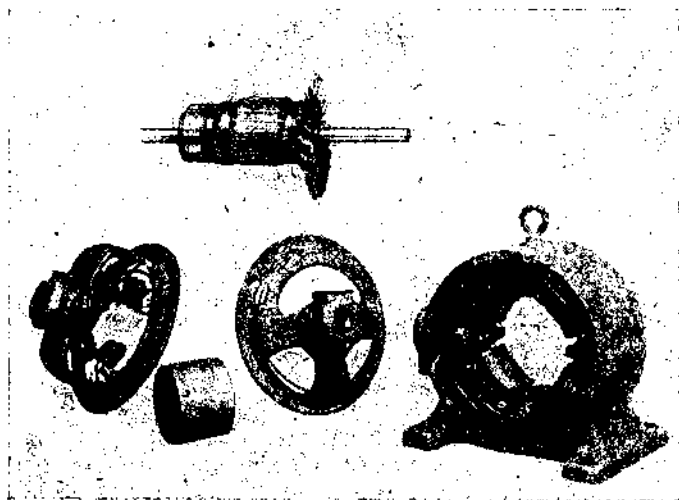


Фиг. 117. Катушка главного полюса на каркасе.



Фиг. 118. Катушка дополнительного полюса на каркасе.

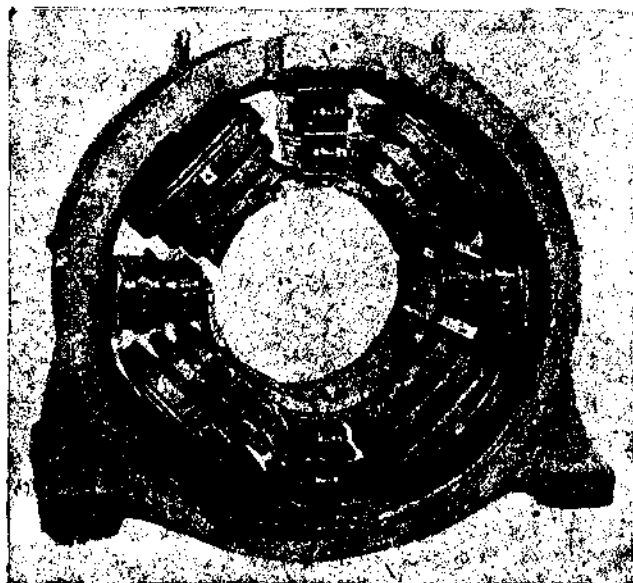
в этом случае наматывается из плоской голой ленточной меди и делится большей частью на две отдельные катушки. Эта лента наматывается вместе с полосой пресшпана такой же ширины, являющегося изоляцией между



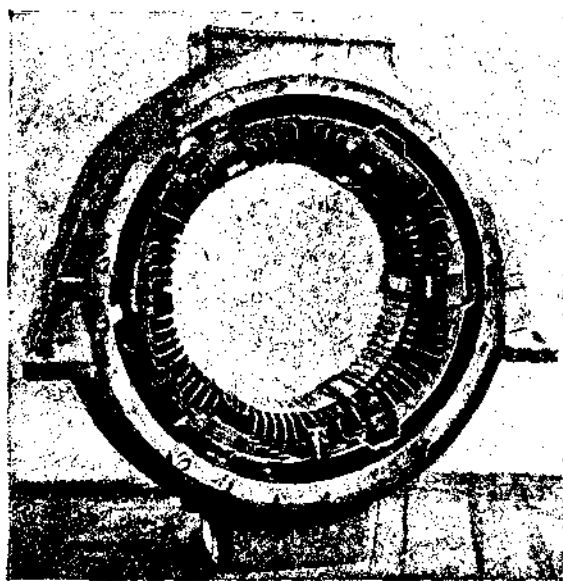
Фиг. 119. Детали машины постоянного тока.

витками. Вся обмотка надевается на дополнительный полюс, обложенный пресшпаном, и укрепляется проволоочными бандажами (фиг. 122) или железными полосами, соединенными между собою болтами и изолированными от обмотки при помощи пресшпановых прокладок (фиг. 120).

Если машина обладает компенсационной обмоткой, то отверстия для нее штампуются в полюсном башмаке. На фиг. 122 представлен статор генератора, у которого в полюсных башмаках видны отверстия для ком-



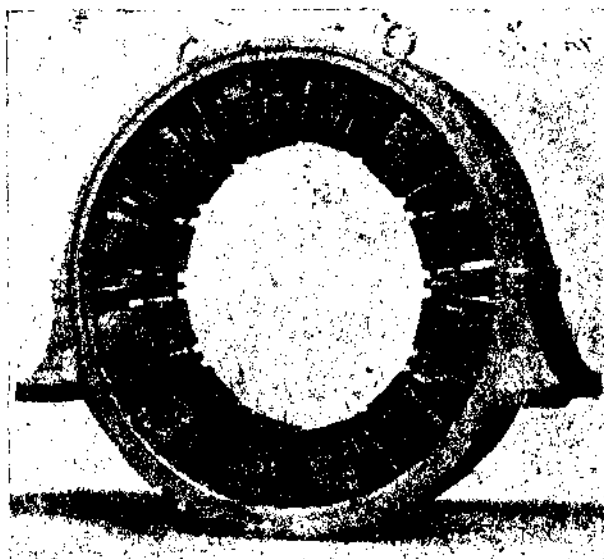
Фиг. 120. Статор турбогенератора.



Фиг. 121. Статор турбогенератора постоянного тока
на 1560 kW, 600 вольт.

пенсационной обмотки. На фиг. 123 показан такой же статор после прокладки компенсационной обмотки. Из-за большого тока стержни соединены здесь по два параллельно. Видно также, что обмотка дополнительных

полюсов и компенсационная обмотка соединены между собою последовательно. На фиг. 121 представлен статор турбогенератора постоянного тока с дополнительными полюсами и компенсационной обмоткой.



Фиг. 122. Статор генератора постоянного тока фирмы Сименс-Шуккерт на 1250 kW, 500 об/мин, 235 вольт.



Фиг. 123. Статор из фиг. 122 после выполнения компенсационной обмотки.

У машины постоянного тока якорь с пазами изготавливается из штампованных листов динамного железа толщиной в 0,5 мм, оклеенных с одной стороны шелковистой бумагой. Для лучшего отведения тепла

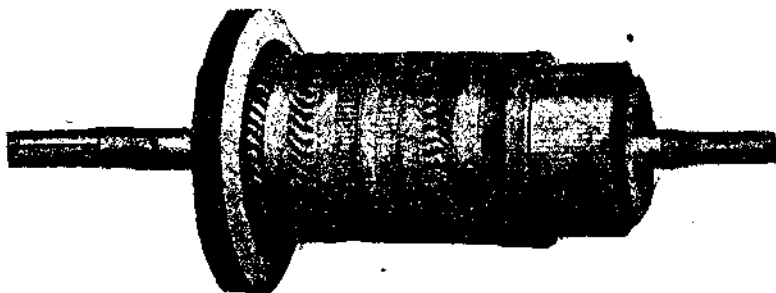
(возникшего благодаря перематгничиванию и вихревым токам в железе, а также из-за омических потерь в обмотке) якорь в больших машинах подразделяется на отдельные пакеты толщиной около 5—6 см с промежутками между ними приблизительно в 1 см. Для сохранения воздушных промежутков к крайним листам пакета приклепываются радиально расположенные ребра или привариваются в отдельных точках угольники из жести (фиг. 124).



Фиг. 124. Крайний лист пакета якоря с приваренными сзади полосками для радиальных каналов.

Охлаждающий воздух выбрасывается из воздушных промежутков под действием центробежной силы и заменяется свежим воздухом, подводимым в осевом направлении через каналы, образованные выемками в железе (фиг. 124). Потребное избыточное давление часто создается вентилятором, прикрепленным к валу (фиг. 119 и фиг. 125).

В меньших машинах (приблизительно до $d=45$ см) листы якоря насаживаются непосредственно на валу (фиг. 124) и скрепляются зажимными дисками. Зажимной диск на одной стороне якоря обычно упирается в имеющийся на валу бортик, тогда как другой диск удерживается стальным кольцом, которое, после спрессовки листов якоря, проникает в паз, выточенный на валу. В пакете железа и в валу предусмотрен паз для шпонки, вводимой для избежания смещения якоря относительно вала. Для предохранения зубцов в крайних листах от изгиба и вибрации к последним приделываются нажимные пальцы, которые или выполняются в виде приливов к зажимным дискам, или приклепываются к крайним листам, или же привариваются к ним. При больших диаметрах листы штампуются кольцеобразно из одного куска или из нескольких частей. Листы насаживаются на звездообразную крестовину и скрепляются зажимными дисками. При кольцевых листах, изготовленных из одного куска, давление на пакет



Фиг. 125. Якорь машины постоянного тока с вентилятором.

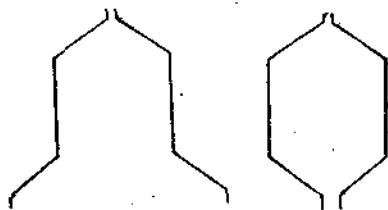
создается прикреплением зажимными дисками к крестовине или, как выше, при помощи заскакивающего кольца. При листах, состоящих из нескольких частей, пакет скрепляется болтами, создающими необходимое давление на зажимные диски. Болты должны быть изолированы от листов, так как в противном случае последние будут электрически соединены между собою, что увеличит потери на вихревые токи в якоре.

Держатели обмоток, на которых покоятся части обмотки, лежащие вне паза (головки обмоток), большей частью выполняются в виде приливов к зажимным дискам.

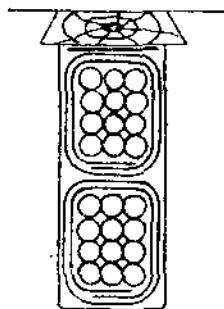
Обмотки якоря машины постоянного тока изготавливаются почти исключительно в виде двуслойных обмоток. В зависимости от мощности и напряжения каждая секция между двумя коллекторными пластинами может состоять из одного или нескольких витков. В первом случае обмотка выполняется в виде стержневой, а во втором случае — в виде шаблонной.

Стержневые обмотки при больших сечениях составляются из отдельных кусков (фиг. 126). Последним перед укладкой в паз придают необходимую форму, изолируют их и покрывают лаком для защиты от влаги воздуха. Отдельные элементы стержня скрепляются друг с другом зажимами. При меньших поперечных сечениях весь виток может быть заранее приготовлен из одного куска.

Шаблонная обмотка применяется почти во всех машинах малой мощности и во многих машинах средней мощности. Секции (фиг. 127) наматываются на особых обмоточных формах (шаблонах). При обыкновенных обмотках (не ступенчатых) все секции, лежащие рядом в одном пазу ($u=5$ на фиг. 127), изолируются вместе перед укладкой в паз. Благодаря одинаковости секций достигается удобство их изготовления, укрепления и смены.



Фиг. 126. Элементы водной обмотки.

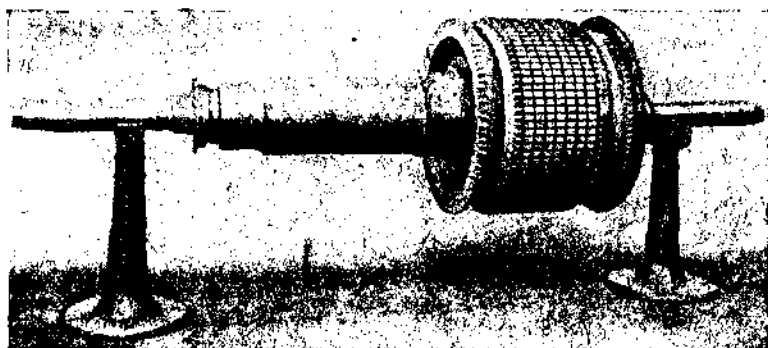
Фиг. 127. Секция обмотки постоянного тока при $u=5$.

Фиг. 128. Изоляция паза.

Изоляция проводов состоит из двукратной хлопчатобумажной оплетки. Секционные стороны, расположенные рядом в одном пазу, обкладываются пресшпановой гильзой, закрываемой внахлестку с нижней стороны и обматываемой хлопчатобумажной лентой. Перед укладкой в паз для защиты от влаги воздуха вся секция пропитывается лаком и сушится. На фиг. 128 представлена изоляция паза с двуслойной обмоткой при $u=3$ (рядом) и 4 витках в секции. Над обеими группами секционных сторон укладывается пресшпановая полоска для более легкого вдвигания деревянной шпонки. Для избежания вихревых токов нередко отказываются от последующей обработки паза. Для того, чтобы в этом случае защитить изоляцию секций от повреждений, паз обкладывается тонким пресшпаном. При высоких напряжениях (приблизительно выше 500 вольт) вместо пресшпана употребляются препараты из слюды.

В машинах постоянного тока приняты главным образом открытые пазы, так как они дают возможность легкой укладки и смены секций.

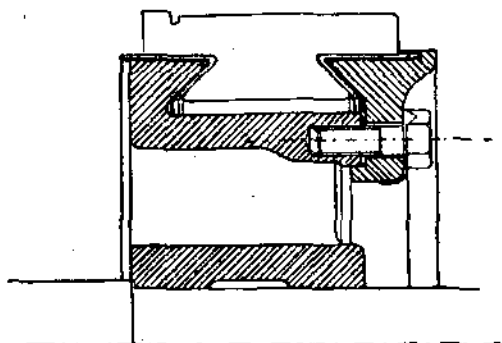
В малых машинах секции удерживаются в пазах только при помощи проволоочных бандажей. В больших машинах каждый паз закрывается деревянной шпонкой (фиг. 128); несмотря на это наматываются, кроме того, и проволоочные бандажы, скрепляющие в особенности головки обмоток (фиг. 125). В турбогенераторах устраивают на головках обмоток особые покрывки из немагнитного материала (фиг. 130) для защиты лобовых соединений от центробежных сил.



Фиг. 129. Якорь турбогенератора постоянного тока без обмотки на 1200 kW, 235 вольт, 1500 об/мин.



Фиг. 130. Якорь из фиг. 129 с обмоткой и коллектором.



Фиг. 131. Коллектор.



Фиг. 132. Миканитовая прокладка в коллекторе.

На фиг. 129 и 130 представлен якорь турбогенератора постоянного тока до и после укладки обмотки.

Полузакрываемые пазы применяются почти исключительно при стержневой обмотке. При этом стержням придается необходимая форма сначала с одной стороны, а затем (после проталкивания через паз) и с другой стороны.

Коллектор состоит из буксы, насаженной на валу или прикрепленной к крестовине якоря, и из коллекторных пластин, скрепляемых этой буксой (фиг. 131). Последние обладают выступом, имеющим форму ласточкина хвоста; при помощи этого выступа пластины укрепляются в коллекторной буксе и затягиваются зажимным кольцом. Пластины изолируются от буксы посредством пропитанного пресшпана; рядом расположенные пластины изолируются друг от друга миканитовыми прокладками (фиг. 132). В мощных машинах коллектор выполняется из двух или трех частей (фиг. 133). Соответствующие пластины соединяются в этом случае гибкими медными лентами, между которыми может проходить охлаждающий воздух. К отросткам (петушкам) коллекторных пластин припаиваются концы секций.

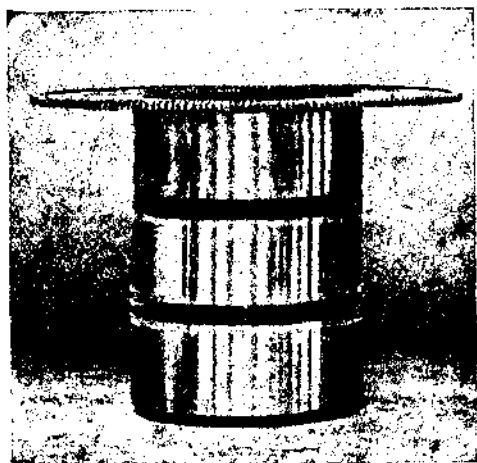
Диаметр коллектора обычно выбирается несколько меньшим, чем диаметр якоря, что делает более удобным соединение пластин с обмоткой. Однако, следует учесть и окружную скорость (приблизительно 14 м/сек) и число пластин, ширина которых не должна быть меньше 4 мм. Быстро вращающиеся коллекторы, как, например, у турбогенераторов с окружной скоростью в 25—35 м/сек, требуют, благодаря большому центробежным усилиям, особых конструкций. Обычно при больших окружных скоростях пластины стягиваются нажимным кольцом, насаженным в горячем состоянии и изолированным при помощи миканитовой прокладки (фиг. 130).

Для охлаждения коллекторных пластин, последние часто снабжаются в осевом направлении отверстиями, через которые может проходить охлаждающий воздух. При конструировании коллекторных букс должны быть предусмотрены выемки, через которые охлаждающий воздух мог бы быть подведен к осевым каналам якоря.

В качестве материала для щеток в машинах постоянного тока почти исключительно применяются графитовые угли. Графит является хорошим смазочным средством для металлов; потери на трение, следовательно, уменьшаются. Большее сопротивление угольных щеток в сравнении с металлическими щетками улучшает условия коммутации.

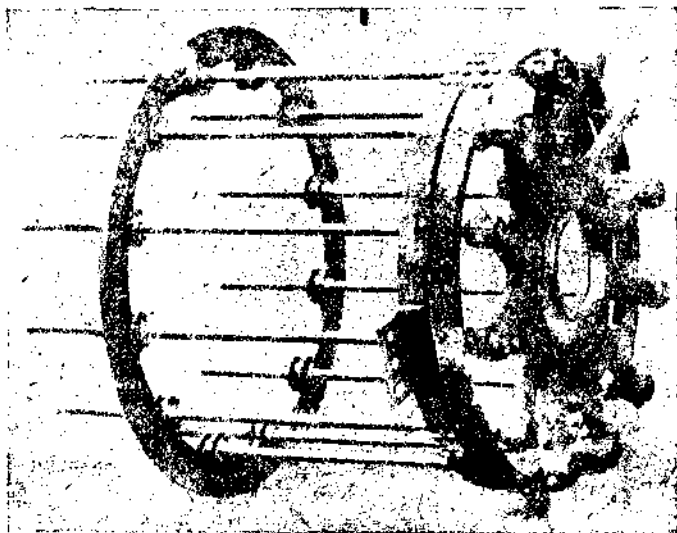
Щетки прижимаются к коллектору при помощи пружины щеткодержателя. Щеткодержатели насажены на латунные болты и электрически соединены с последними. Болты изолируются от щеточной траверсы. Последняя или изготовляется в виде звезды и насаживается на шейку подшипника (фиг. 113), или же получает форму кольца и прикрепляется к станине машины (фиг. 114).

В машинах без дополнительных полюсов следует выполнять щеточные траверсы смещающимися; в малых машинах установка щеток в положение меньшего искрения осуществляется при помощи рукоятки, прикрепленной к траверсе (фиг. 113), в больших же машинах такая установка достигается при помощи шпинделя, снабженного ручным маховиком (фиг. 114).



Фиг. 133. Коллектор, составленный из трех частей.

На фиг. 134 представлена звездообразная траверса; оба кольца справа являются собирательными кольцами, электрически соединенными попеременно с соответствующими щеточными болтами; обе накладке на сборных кольцах служат для соединения с зажимами машины.



Фиг. 134. Щеточная траверса.

§ 12. Расчет машины постоянного тока.

Расчет машины постоянного тока лучше всего разъяснить на готовом примере. В качестве последнего рассмотрим шунтовой генератор постоянного тока с следующей табличкой мощности (фиг. 135):

Напряжение у зажимов . . . $U=460$ вольт.
 Ток в сети $I=174$ амп.
 Мощность $N=80$ kW.
 Число оборотов $n=970$ обор./мин.

Размеры электрической машины — это прежде всего вопрос о нагревании. Чем больше допустимое нагревание, тем меньше могут быть взяты размеры машины. (При этом все же необходимо следить за тем, чтобы коэффициент полезного действия не ухудшился, так как малая дешевая машина с плохим коэффициентом полезного действия при известных обстоятельствах может оказаться менее экономичной, чем большая и дорогая, но с хорошим к. п. д.). Чем больше поперечные сечения железа и меди, а следовательно, и размеры машины, тем меньше становятся потери, а тем самым и нагревание, при той же мощности.

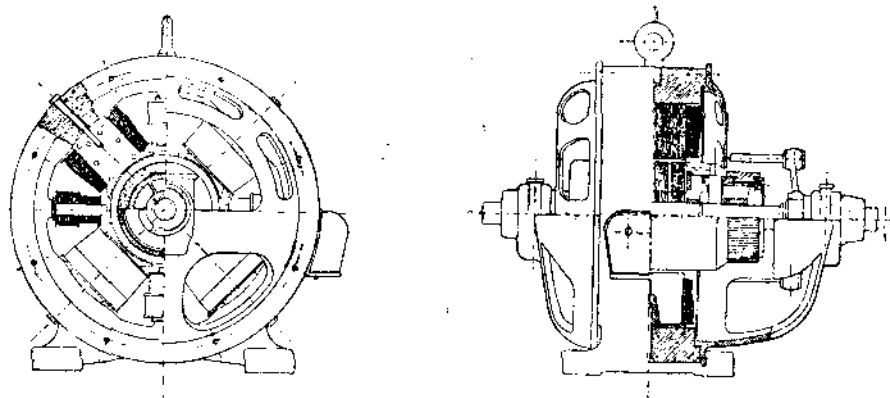
В § 9 были рассмотрены отдельные источники потерь в электрической машине. Как уже было доказано, мерой для потерь в железе и на возбуждение является ЭДС машины, тогда как потери в меди обмотки якоря определяются силой тока, проходящей через якорь. Произведение из ЭДС и тока в якоре называется внутренней мощностью N_i (§ 10). Она является критерием для нагревания, а следовательно, и для размеров машины.

Внутренняя мощность включает в себе у генератора: полезную мощность + потери в меди + потери на возбуждение у двигателя: полезную мощность + потери в железе + потери на трение; внутренняя мощность поэтому несколько больше полезной мощности. Внутреннюю мощность можно подсчитать по приближенной формуле

$$N_i = N \frac{1+\eta}{2\eta}, \dots \dots \dots (195)$$

где η — коэффициент полезного действия машины ¹⁾.

Составляющие внутренней мощности, а именно ЭДС и сила тока, являются величинами, зависящими от случайных соотношений в сети, и не оказывают непосредственно никакого влияния на размеры машины. Необходимо поэтому выразить внутреннюю мощность через другие величины, не зависящие от случайных соотношений напряжения и силы тока, и таким образом получить возможность сравнивать различные машины в отношении их использования.



Фиг. 135. Генератор постоянного тока фирмы Сименс-Шуккерт на 80 kW, 970 об/мин, 460 вольт.

Согласно ур. (30 a) мы имеем:

$$N_i = E \cdot I_A = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot z \cdot I_A \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ ватт} \dots \dots \dots (196)$$

Такую же зависимость мы получим, написав для двигателя произведение из момента вращения (ур. 40) и угловой скорости:

$$N_i = 9,81 D \cdot \omega = 9,81 \cdot D \cdot \frac{2\pi n}{60} \text{ ватт} \dots \dots \dots (197)$$

Этого и следовало ожидать, так как внутренняя мощность — это именно та мощность, которая в электрической машине целиком передается от механической стороны на электрическую (генератор) или наоборот (двигатель) (см. также § 10).

Для того, чтобы освободиться от случайных величин в ур. (196) (число полюсов, число параллельных ветвей, число проводов, сила тока, поток), мы введем в него индукцию в воздушном зазоре B_L и линейную нагрузку A .

¹⁾ R. Richter. Elektrische Maschinen 1, 541. Springer, Berlin, 1924.

Согласно ур. (50) индукция B_L равна

$$B_L = \frac{\Phi}{l_i \tau}; \dots \dots \dots (198)$$

здесь $\alpha = \frac{l_i}{\tau}$ — отношение расчетной полюсной дуги к полюсному делению, а именно коэффициент магнитного перекрытия (в машинах постоянного тока в среднем $\alpha=0,675$).

Следовательно:

$$\Phi = \alpha \cdot B_L \cdot l_i \cdot \tau = \alpha \cdot B_L \cdot l_i \cdot \frac{\pi d}{2p}, \dots \dots \dots (199)$$

где l_i — идеальная длина якоря из ур. (49) и d — диаметр якоря машины. Линейную нагрузку y машины мы получим из ур. (81):

$$A = \frac{I_A \cdot z}{2a \cdot \pi \cdot d} \text{ амп/см} \dots \dots \dots (200)$$

Таким образом

$$N_i = \pi^2 \cdot \frac{n}{60} \cdot \alpha \cdot A \cdot B_L \cdot l_i \cdot d^2 \cdot 10^{-8} \text{ ватт} \dots \dots \dots (201)$$

Это уравнение дает зависимость между размерами машины ($l_i \cdot \pi \cdot d^2 =$ —объему якоря) и ее удельной тепловой напряженностью, характеризуемой величинам A и B_L . Чем меньшие размеры ($l_i \cdot d^2$) взяты для машины, тем выше становятся значения A и B_L при той же внутренней мощности и том же числе оборотов.

Индукция B_L является, главным образом, мерой для магнитной нагрузки железа, а тем самым и для возникающих в железе тепловых потерь, линейная нагрузка A определяет джоулево тепло в обмотке якоря. Потери, являющиеся мерой джоулева тепла в обмотке якоря, получаются из ур. (136) и (137)

$$V_A = I_A^2 \cdot R_A = I_A^2 \cdot \rho \cdot \frac{l_m \cdot z}{(2a)^2 \cdot q} = \frac{I_A}{2a} \cdot i \cdot \rho \cdot l_m \cdot z \cdot \text{ватт}, \dots \dots \dots (202)$$

где $\frac{I_A}{2a \cdot q} = i$ амп/мм² — плотность тока в проводе.

Вместе с ур. (200) мы получаем

$$V_A = \rho \cdot A \cdot i \cdot \pi \cdot d \cdot l_m \text{ ватт} \dots \dots \dots (203)$$

или, отнесенные к 1 см² поверхности якоря:

$$V_A' = \frac{\rho \cdot A \cdot i}{100} \text{ ватт/см}^2 \text{ } ^1) \dots \dots \dots (204)$$

Таким образом линейная нагрузка и плотность тока определяют джоулевы потери в электрических машинах.

Согласно Snell и Esson ур. (201) пишут следующим образом:

$$N_i = C \cdot l_i d^2 \cdot n \cdot 10^{-3} \text{ ватт}, \dots \dots \dots (205)$$

где C — постоянная мощности или коэффициент использования машины; сравнивая с ур. (201), мы получаем

$$C = \frac{\pi^2}{60} \alpha \cdot A \cdot B_L \cdot 10^{-5} \approx 1,1 \cdot A \cdot B_L \cdot 10^{-6} \text{ ваттмин./см}^3 \dots \dots \dots (206)$$

¹⁾ ¹/₁₀₀ так как величина l_m в ур. (137) при подсчете сопротивления подставлена в м.

Коэффициент использования бывает равен от 1 до 4; с возрастанием машины он возрастает, что видно из следующих соображений ¹⁾.

Если умножить все размеры машины на один и тот же множитель α (диаметр — $\alpha \cdot d$, длина — $\alpha \cdot l$), то различные данные машины изменятся следующим образом. Поверхность охлаждения возрастет пропорционально квадрату линейного приращения ($\alpha^2 \cdot O$); охлаждающая способность на единицу охлаждающей поверхности возрастет приблизительно пропорционально квадратному корню из окружной скорости, следовательно корню из приращения диаметра ($\sqrt{\alpha} \cdot k$); суммарная способность к теплоотдаче возрастет, следовательно, пропорционально 2,5 степени от приращения размеров машины ($\alpha^{2.5} \cdot k \cdot O$). Оставляя ту же индукцию в воздухе (B_L) и ту же плотность тока (i), мы получим возрастание ЭДС с возрастанием потока, следовательно, с возрастанием поверхности ($\alpha^2 \cdot E$), а также возрастание тока с возрастанием поперечного сечения провода ($\alpha^2 \cdot I$); мощность, следовательно, возрастет в α^4 раз ($\alpha^4 \cdot N$). При этом линейная нагрузка согласно ур. (200), возрастет до ($\alpha \cdot A$), следовательно, при том же B_L коэффициент использования будет равен $\alpha \cdot C$. Потери в железе здесь все же возрастают пропорционально объему железа ($\alpha^3 \cdot V_E$), а джоулевы потери, согласно ур. (203), будут равны $\alpha^3 \cdot V_A$. Так как способность к теплоотдаче возрастает лишь с 2,5 степенью размеров, то увеличенная машина, при принятых предположениях и равноценной вентиляции, будет нагреваться сильнее, чем малая машина. Необходимо поэтому уменьшить нагрузки (B_L и i).

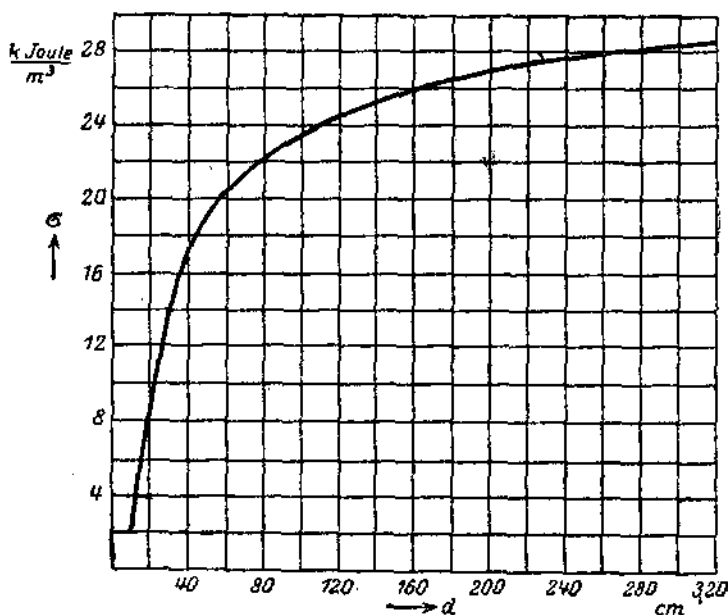
При равномерном снижении магнитной нагрузки ($\sqrt[4]{\frac{1}{\alpha}} \cdot B_L$) и электрической ($\sqrt[4]{\frac{1}{\alpha}} \cdot i$) мы получаем из величин поверхности и индукции величину ЭДС ($\alpha^{1.75} E$), а из величин поперечного сечения и плотности тока силу тока $\alpha^{1.75} I$; следовательно, мощность равна $\alpha^{3.5} N$; линейная нагрузка, согласно ур. (200), равна $\alpha^{0.75} A$; коэффициент использования, таким образом, получают из индукции и объема тока равным $\sqrt{\alpha} \cdot C$. При этом потери в железе пропорциональны объему железа и квадрату индукции ($\alpha^{3.5} V_E$), а джоулевы потери, согласно ур. (203), равны $\alpha^{2.5} V_A$; теперь возрастание потерь будет, следовательно, соответствовать увеличению способности к теплоотдаче.

Из этих соображений следует, что коэффициент использования C можно увеличивать приблизительно пропорционально квадратному корню из приращения размеров машины. Кривая коэффициента использования в функции от размеров машины имеет приблизительно форму параболы (фиг. 136). Однако, благодаря некоторым другим явлениям, возникают отклонения от формы параболы. При малых диаметрах якоря с параллельными плоскостями боков паза наблюдается сильное сужение железа зубца у его основания (фиг. 41), что при той же индукции в воздухе вызывает возрастание индукции в зубцах; при малых диаметрах необходимо поэтому уменьшить индукцию в воздухе или выбрать меньшую ширину паза, благодаря чему уменьшается объем тока машины. Вследствие этого коэффициент использования при малых диаметрах якоря уменьшается еще сильнее. С другой стороны, в больших машинах число проводов в пазу большей частью меньше, чем в малых машинах, благодаря чему пространство

¹⁾ B. Závada. Einige Betrachtungen über die Leistungskonstante elektrischer Maschinen. Elektrotechnik und Maschinenbau, 1916, S. 126.

паза в больших машинах лучше используется; поэтому возможно увеличение коэффициента использования. На величину коэффициента использования оказывают известное влияние также напряжение у зажимов и число полюсов, что однако не будем здесь рассматривать подробнее.

В настоящее время, по предложению Эмде¹⁾, для суждения о степени использования машины часто пользуются понятием среднего вращающего усилия σ , представляющего собою среднее касательное усилие, отнесенное к единице поверхности якоря.



Фиг. 136. Среднее удельное окружное усилие в функции от диаметра якоря.

Введя в ур. (197) для момента вращения величину

$$D = K \cdot \frac{d}{2} \cdot 10^{-2} \text{ кгм}, \dots \dots \dots (207)$$

где K — усилие в кг, приложенное касательно к поверхности якоря, а d — диаметр якоря в см, мы получим:

$$K = \frac{N_i}{9,81 \cdot \frac{2\pi n}{60} \cdot \frac{d}{2}} \cdot 10^2 \text{ кг} \dots \dots \dots (208)$$

Поверхность якоря равна:

$$F = \pi \cdot l_i \cdot d \text{ см}^2 \dots \dots \dots (209)$$

Таким образом, среднее вращающее усилие равно:

$$\sigma = \frac{K}{F} = \frac{N_i}{9,81 \cdot \pi^2 \cdot \frac{n}{60} \cdot l_i \cdot d^2} \cdot 10^2 \text{ кг/см}^2 \dots \dots \dots (210)$$

или

$$\sigma = \frac{N_i}{\pi^2 \cdot \frac{n}{60} \cdot l_i \cdot d^2} \text{ джоулей/см}^3 \dots \dots \dots (210a)$$

¹⁾ F. Emde. Leistungsparameter und mittlerer Drehschub. Elektrot. Ztschr., 1922, S. 1430.

Следовательно, совместно с ур. (201) имеем:

$$\sigma = \alpha \cdot A \cdot B_L \cdot 10^{-8} \text{ джоулей/см}^3 \dots \dots (211)$$

или

$$\sigma = \alpha \cdot A \cdot B_L \cdot 10^{-5} \text{ килоджоулей/м}^3 \approx 0,675 \cdot A \cdot B_L \cdot 10^{-5} \text{ килоджоулей/м}^3 (211a)$$

Сравнив эту величину с ур. (206), мы видим, что среднее вращающее усилие пропорционально коэффициенту использования. Изменение величины σ при возрастании диаметра якоря следует поэтому тем же законам, что и коэффициент использования. На фиг. 136 представлено изменение среднего вращающего усилия в функции от диаметра якоря для открытых машин постоянного тока без вентиляторов¹⁾. При наличии вентилятора нагрузки могут быть несколько повышены.

При выборе числа полюсов следует учитывать, что при большем числе полюсов поперечные сечения ярма и якоря, а следовательно, и вес машины становятся меньше, так как при том же суммарном потоке величина потока в каждом полюсе уменьшается с возрастанием числа полюсов; уменьшается также и вес меди якоря, так как полюсные деления становятся меньше, благодаря чему укорачиваются лобовые соединения проводов. При большем числе полюсов машина получится, следовательно, легче. Рассеяние полюса при небольших полюсных делениях однако увеличивается, так что приходится часто уменьшать коэффициент перекрытия полюса α , а тем самым и использование машины. Поэтому редко выбирают ширину полюсного деления меньше $\tau = 25 \text{ см}$.

По Рихтеру (Richter) машины с средним числом оборотов обычно выполняются следующим образом:

4-полюсными	— при $d \leq 40$ до 45 см, или $\frac{N_i}{n} \leq 100$ до 150 ватт/мин.
6	" " $d \leq 70$ " 75 " " $\frac{N_i}{n} \leq 500$ " 600 ватт/мин.
8	" " $d \leq 120$ " 130 " " $\frac{N_i}{n} \leq 2100$ " 2700 ватт/мин.

машины с 10 и больше полюсами — при $d \geq 120$ до 130 см, при чем величина полюсного деления не берется больше 50 см.

Дальше необходимо следить за тем, чтобы частота перемагничивания, являющаяся мерой для потерь в железе (ур. 141), получалась не слишком большой. В качестве средней частоты можно взять 30 пер./сек; она все же колеблется между 10 и 50 пер./сек, а у турбогенераторов возрастает почти до 80 пер./сек.

В выбранном примере внутренняя мощность, при выбранном коэффициенте полезного действия $\eta = 90\%$, будет равна (ур. 195)

$$N_i = 80 \frac{1+0,9}{2 \cdot 0,9} = 84,5 \text{ kW}, \dots \dots (212)$$

следовательно

$$\frac{N_i}{n} = \frac{84500}{970} \approx 87 \text{ ваттмин.} \dots \dots (213)$$

По вышеприведенной таблице выбираем: $2p = 4$. Частота перемагничивания, согласно ур. (141), равна

$$f = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot 970}{60} = 32,3 \text{ пер./сек.} \dots \dots (214)$$

¹⁾ R. Richter. Elektrische Maschinen. S. 143, 545. Springer, Berlin, 1924.

При выборе диаметра необходимо следить за тем, чтобы окружная скорость якоря не получалась слишком большой; для обыкновенных машин принято брать окружную скорость от 10 до 30 м/сек, для турбогенераторов $v_A < 90$ м/сек; для машин постоянного тока без дополнительных полюсов окружная скорость выбирается между 12 и 18 м/сек.

Выбором диаметра при заданном коэффициенте использования (ур. 205 и 210а) предопределяется и длина l_i машины. Отношение расчетной длины якоря l_i к полюсному делению $\tau = \frac{\pi d}{2p}$, равное

$$\lambda = \frac{l_i}{\tau} = \frac{l_i \cdot 2p}{\pi \cdot d}, \dots \dots \dots (215)$$

должно из экономических соображений оставаться в известных пределах, а именно:

$$0,5 \approx \lambda \leq 1,0 \dots \dots \dots (216)$$

При меньших значениях λ бесполезно увеличивается отношение длины лобовых соединений, неактивных в магнитном отношении, ко всей длине обмотки якоря, благодаря чему возрастает и вес меди в якоре.

При больших значениях λ , при том же поперечном сечении полюса возрастает средняя длина витков возбуждения, а тем самым и вес обмоток возбуждения. Вводя величину λ в ур. (210а), мы получим:

$$\frac{N_i \cdot p}{\frac{\pi}{60} \cdot \lambda} = \frac{\pi^3}{2} \cdot \sigma \cdot d^3 \dots \dots \dots (217)$$

Из фиг. 136 можно определить произведение $\sigma \cdot d^3$, удовлетворяющее ур. (217), а тем самым и заданным соотношениям. Для средних мощностей диаметр может быть определен из следующей приближенной формулы¹⁾:

$$d = 6,5 + 5,06 \sqrt[3]{\frac{N_i \cdot p}{\pi \lambda}} \text{ см} \dots \dots \dots (218)$$

Для данного примера выбираем

$$\lambda = 0,67; \dots \dots \dots (219)$$

согласно ур. (217), мы имеем:

$$\sigma \cdot d^3 = \frac{N_i \cdot 60 \cdot p \cdot 2}{\pi \cdot \lambda \cdot \pi^3} = \frac{84 \cdot 500 \cdot 60 \cdot 2 \cdot 2}{970 \cdot 0,67 \cdot \pi^3} = 1000 \text{ джоулей} = 1,0 \text{ килоджоуля}, \dots (220)$$

из фиг. 136 для $d = 39$ см получается:

$$\sigma \approx 17 \text{ килоджоулей/см}^3,$$

следовательно,

$$\sigma \cdot d^3 = 1,01 \text{ килоджоуля.}$$

По приближенной формуле (218) мы имеем:

$$d = 6,5 + 5,06 \sqrt[3]{\frac{84 \cdot 500 \cdot 2}{970 \cdot 0,67}} = 38,9 \text{ см} \dots \dots \dots (221)$$

Коэффициенты использования из фиг. 136 действительны для машин без вентиляторов. В рассматриваемой машине требуется предусмотреть вентилятор, а потому ее использование может быть увеличено. Выбираем:

$$\underline{d = 37 \text{ см}} \dots \dots \dots (222)$$

¹⁾ R. Richter. Elektrische Maschinen. 1.541 Springer, Berlin, 1924.

Этот диаметр соответствует величине $\sigma = 19,6$ килоджоулей/м³. В этом случае окружная скорость якоря равна:

$$v_A = \frac{d\pi \cdot n}{60} = \frac{37 \cdot \pi \cdot 970}{60} = 1880 \text{ см/сек} = 18,8 \text{ м/сек} \quad (223)$$

Полюсное деление равно

$$\tau = \frac{d\pi}{2p} = \frac{37 \cdot \pi}{4} = 29 \text{ см.} \quad (224)$$

Таким образом, расчетная длина якоря согласно ур. (215) и (219) будет равна

$$l_i = \lambda \cdot \tau = 0,67 \cdot 29 = 19,5 \text{ см.} \quad (225)$$

Согласно ур. (49) мы имеем (фиг. 228)

$$l_i = \frac{l_p + l_e}{2} \quad (226)$$

Суммарная длина якоря равна

$$l_a = l_e + n \cdot s, \quad (227)$$

где l_e — суммарная длина железа, n — число каналов для охлаждения, а s — ширина этих промежутков. Осевая длина полюсного башмака l_p выбирается им равным l_a или несколько (на 1 см) меньше для того, чтобы индукционные линии проходили от лобовых поверхностей полюсных башмаков в якорь в радиальном направлении (без образования вредных вихревых токов).

Выбираем

$$l_a = l_p \quad (228)$$

Согласно § 9, для лучшего отведения возникающего тепла якорь делят на отдельные пакеты толщиной от 5 до 6 см. Соответственно этому для рассматриваемой машины предусмотрено разделение якоря на 4 пакета; число воздушных промежутков между ними будет следовательно равно

$$n = 3, \quad (229)$$

а ширина их

$$s = 1 \text{ см.} \quad (230)$$

Из ур. (226), (227) и (228) мы имеем:

$$l_p = 2l_i - l_e = 2l_i - (l_a - 3) = 2l_i - l_a + 3 = 2l_i - l_p + 3, \quad (231)$$

$$l_p = \frac{2l_i + 3}{2} = \frac{2 \cdot 19,5 + 3}{2} \quad (232)$$

$$l_p = l_a = 21 \text{ см.} \quad (233)$$

Согласно ур. (227)

$$l_e = l_a - 3 = 18 \text{ см.} \quad (234)$$

Отношение расчетной полюсной дуги b_i к полюсному делению τ колеблется:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для машин с дополнительными полюсами: } 0,6 \leq \alpha \leq 0,75 \\ \text{„ „ без дополнительных полюсов: } 0,65 \leq \alpha \leq 0,8 \end{array} \right\} \quad (235)$$

Величину α стремятся выбрать возможно большей, так как этим самым удастся увеличить использование машины (ур. 206 и 211). Одновременно с увеличением величины α уменьшается однако расстояние между

двумя соседними полюсными башмаками, так что все большая часть потока полюса начинает замыкаться через междуполюсное пространство (поток рассеяния, см. § 5), не имея при этом сцепления с витками якоря. Кроме того, благодаря увеличению ширины полюсного башмака усиливается действие реакции якоря (§ 6). Не следует поэтому выбирать величину α слишком большой. Коэффициент перекрытия полюса может быть взят тем большим, чем больше полюсное деление. Выбираем

$$\alpha = \frac{b_l}{\tau} = 0,75 \dots \dots \dots (236)$$

В первом приближении можно взять ширину полюсного башмака b равной расчетной полюсной дуге b_l :

$$b \approx b_l = 0,75 \cdot 29 = 21,8 \text{ см} \dots \dots \dots (237)$$

Выбором размеров машины предопределяется ее использование, а тем самым и произведение $A \cdot B_L$ (ур. 211). Этими двумя величинами устанавливается нагревание в различных частях машины. Наиболее благоприятным будет такое распределение обоих множителей произведения $A \cdot B_L$, при котором нагревания в соответствующих частях машины (A — обмотка якоря, B_L — железо якоря, обмотка полюсов) приблизительно равны между собою или одинаково близко подходят к установленным пределам нагрева. Аналогично коэффициенту использования должны с увеличением размеров машины возрасти линейная нагрузка и индукция в воздухе.

За средние величины принимаются следующие:

$$\left. \begin{aligned} A &= 200 \div 400 \text{ амп/см,} \\ B_L &= 7\,000 \div 9\,000 \text{ гаусс.} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (238)$$

Для турбогенераторов, учитывая их высокую частоту перемагничивания, выбираются низкие индукции в воздухе (приблизительно $B_L = 5\,000$ гауссов).

Принимая

$$B_L = 8\,150 \text{ гауссов,} \dots \dots \dots (239)$$

мы получаем для потока, согласно ур. (50) [см. также ур. (225 и 237)]:

$$\Phi = B_L \cdot l \cdot b_l = 8\,150 \cdot 19,5 \cdot 21,8 = 3,47 \cdot 10^6 \text{ максвеллов} \dots \dots (240)$$

При проектировании обмотки целесообразнее всего исходить из необходимой ЭДС E . Для шунтовой машины ур. 196 вместе с ур. (175) дают:

$$N_i = E \cdot I_A = E(I + i_e), \dots \dots \dots (241)$$

где I_A — ток в якоре, I — ток в сети и i_e — ток возбуждения.

Принимая ток возбуждения равным $i_e = 2$ амл., мы получим для ЭДС

$$E = \frac{N_i}{I + i_e} = \frac{84\,500}{174 + 2} = 480 \text{ вольт} \dots \dots \dots (242)$$

Число проводов одной ветви, которое необходимо соединить последовательно, равно [ур. 30а)]:

$$\frac{z}{2a} = \frac{30}{p} \cdot \frac{E}{\pi} \cdot \frac{10^8}{\Phi} = \frac{30 \cdot 480 \cdot 10^8}{2 \cdot 970 \cdot 3,47 \cdot 10^6} = 214 \frac{\text{проводов}}{\text{ветвь}} \dots \dots \dots (243)$$

Благодаря относительно высокому напряжению при малых размерах машины число проводов получается настолько большим, что не требуется многократного параллельного соединения (§ 7). Выбирают поэтому обмотку с наименьшим числом параллельных ветвей, а именно одноходовую волновую обмотку с числом ветвей

$$2a \approx 2 \dots \dots \dots (244)$$

Суммарное число проводов машины будет, следовательно, равно

$$z = 2 \cdot 214 = 428 \text{ проводов} \dots \dots \dots (245)$$

или суммарное число витков:

$$\omega = \frac{z}{2} = 214 \text{ витков} \dots \dots \dots (246)$$

Для того, чтобы достигнуть возможно меньшего напряжения между пластинами (§ 7), а тем самым и удовлетворительной коммутации, выбирают число пластин возможно большим в той мере, в какой это допускается окружной скоростью коллектора и шириной его пластины. В рассматриваемом случае оказывается возможным (см. ниже) подводить каждый виток к коллекторной пластине, так что каждая секция состоит из одного витка (стержневая обмотка). В этом случае число коллекторных пластин равно числу витков:

$$k = \omega = 214 \text{ коллекторных пластин} \dots \dots \dots (247)$$

Обмотка выполняется в виде двуслойной, так что у каждого витка один стержень будет находиться в верхнем слое, а другой стержень — в нижнем слое. Благодаря большому числу проводов должно быть расположено рядом несколько стержней; при этом должно быть выполнено условие ур. (97):

$$k = N \cdot u, \dots \dots \dots (248)$$

где k — число коллекторных пластин, N — число пазов, u — число проводов лежащих рядом в одном слое паза. С другой стороны должно быть удовлетворено условие выполнимости обыкновенной волновой обмотки ур. (96) заключающееся в том, чтобы величина

$$y = \frac{k-1}{p} \dots \dots \dots (249)$$

равнялась бы целому числу.

После этого необходимо задаться различными значениями для величины u и определить, исходя из ур. (248), число пазов:

1) $u = 3$; $N = 71$ паз; $k = N \cdot u = 213$ пластин. Это число пазов слишком велико. Оно дает слишком мелкие пазы, а тем самым и плохое использование пазового пространства. Однако пазы не должны быть и слишком большими, ибо в противном случае возникнут большие потери на поверхности полюсных башмаков (§ 9) и машина будет „завывать“ при нагрузке. Обычно берут от 10 до 12 пазов на один полюс; в больших машинах число их по возможности увеличивают, а в малых машинах уменьшают, если это необходимо, до 8 пазов и меньше на один полюс.

2) $u = 4$; $N = 53$ паза; $k = N \cdot u = 212$ коллекторных пластин. Число пластин не удовлетворяет здесь условию из ур. (249). Обмотка выполняется лишь при наличии одной мертвой секции¹⁾. Такого устройства все же по возможности избегают.

3) $u = 5$; $N = 43$ паза; $k = N \cdot u = 215$ пластин. Такое устройство с пятью стержнями, лежащими рядом в одном слое паза, дает для рассматриваемого случая вполне пригодную обмотку. Результирующий шаг обмотки равен [ур. (249)]:

$$y = \frac{k-1}{p} = \frac{215-1}{2} = 107 \text{ пластин} \dots \dots \dots (250)$$

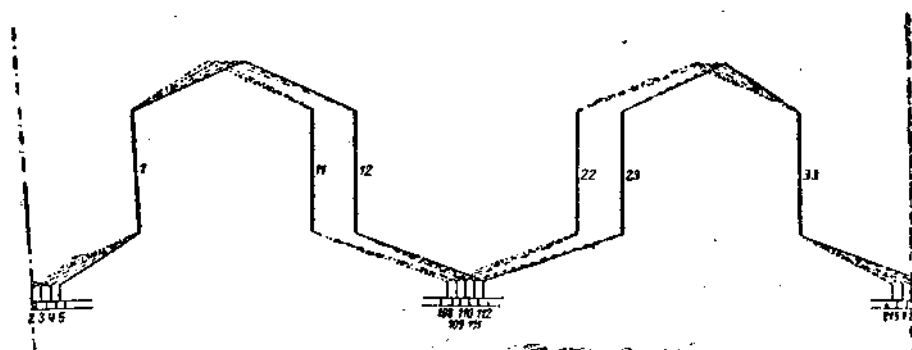
¹⁾ R. Richter. Ankerwicklungen. S. 95 ff. Berlin, Springer, 1920.

Для волновой обмотки из ур. (86) мы имеем:

$$y = y_1 + y_2 \dots \dots \dots (251)$$

При выборе ширины секции y_1 необходимо решить, будет ли выполнена обмотка обыкновенной или ступенчатой (фиг. 69 и 70). Для получения более равномерной ЭДС коммутации в различных пазах (§ 7), необходимо выполнить обмотку в виде ступенчатой; при этом ширина секции y_1 не должна делиться на число секционных сторон u , лежащих рядом в одном пазу. Ширину секции берут приблизительно равной полюсному делению или (выражая в шагах по коллектору) половине обмоточного шага, для того, чтобы по возможности охватить весь полезный поток:

$$\left. \begin{array}{l} \text{ширина секции: } y_1 = 53 \text{ шагам по коллектору} \\ \text{замыкающий шаг: } y_2 = y - y_1 = 54 \text{ шагам по коллектору} \end{array} \right\} \dots (252)$$



— Первый — Второй — Третий — Четвертый — Пятый обход

Фиг. 137. Схема обмотки.

В пазовых шагах ширина секции выразится:

$$\frac{y_1}{u} = \frac{53}{5} = 10 \frac{3}{5}, \dots \dots \dots (253)$$

это значит (фиг. 137), что из паза 1 идут:

2 короткие секции в паз 11
3 длинные " " " 12

При расчете паза исходят из максимального значения кажущейся индукции B_z' в наиболее узком месте зубца, следовательно, у его основания [ур. (61)]. Эту индукцию выбирают в пределах:

$$B_z' \approx 20\,000 \text{ до } 23\,000 \text{ гауссов} \dots \dots \dots (254)$$

Пазовый шаг равен [ур. (59)]:

$$t = \frac{\pi d}{N} = \frac{\pi \cdot 37}{43} = 2,7 \text{ см} \dots \dots \dots (255)$$

Глубина паза лежит в пределах от

$$h = 30 \text{ до } 60 \text{ мм} \dots \dots \dots (256)$$

Диаметр окружности основания зубцов равен:

$$d_{z_f} = d - 2h \dots \dots \dots (257)$$

Выбирая глубину паза $h = 35$ мм и максимальную индукцию в зубце $B_{z_1} = 21\,000$ гауссов, мы получим ширину паза из ур. (61):

$$b_N = \frac{\pi d}{N} \left(1 - \frac{2h}{a} - \frac{l_i}{k_E l_s} \cdot \frac{B_L}{B_{z_1}} \right) = 2,7 \left(1 - \frac{7}{37} - \frac{19,5 \cdot 8\,150}{0,9 \cdot 18 \cdot 21\,000} \right) = 0,925 \text{ см} \approx 9,3 \text{ мм} \quad (258)$$

Принимаем $b_N = 9,4$ мм.

Глубина паза относится обычно к его ширине, приблизительно, как 4:1.

Из выбранных размеров паза определяется поперечное сечение провода, равное $13 \times 1,1 = 14,3$ мм².

Провода изолируются двойной хлопчатобумажной оплеткой; толщина ее с двух сторон равна 0,4 мм. Для предохранения обмотки от влажности воздуха провода с оплеткой пропитываются лаком, что увеличивает толщину оплетки, приблизительно, на 10% (т.е. 0,05 мм).

Из-за наличия ступенчатой обмотки стержни, лежащие рядом в одном слое, не могут изолироваться вместе. Поэтому для паза предусматривают лишь закрывающуюся гильзу, толщиной в 0,6 мм, и отделяют верхний слой от нижнего полосой пресшпана такой же толщины. Такими же полосами усиливается изоляция на дне паза и под деревянным клином (фиг. 138). Таким образом, получаем следующую картину заполнения паза:

Ширина:

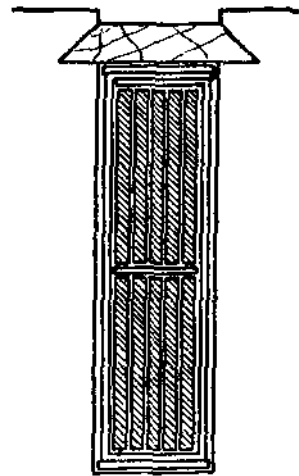
Провода	$5 \times 1,1$	мм = 5,5	мм
Оплетка	$5 \times 0,4$	" = 2,0	"
Пропитка лаком	$5 \times 0,05$	" = 0,25	"
Гильза	$2 \times 0,6$	" = 1,2	"
Запас		0,45	"

Итого ширина 9,40 мм

Глубина:

Провода	2×13	мм = 26,0	мм
Оплетка	$2 \times 0,4$	" = 0,8	"
Пропитка лаком	$2 \times 0,05$	" = 0,1	"
Гильза	$3 \times 0,6$	" = 1,8	"
Пресшпан	$3 \times 0,6$	" = 1,8	"
Запас		0,5	"
Клин		4,0	"

Итого глубина . . 35,0 мм



Фиг. 138. Паз.

Запас в 0,3 до 0,5 мм следует предусмотреть при ступенчатых обмотках для облегчения укладки проводов в паз, так как здесь провода одного пазового слоя не могут быть вместе намотаны на шаблоны.

Необходимо, кроме того, проверить, не велика ли плотность тока в проводе при выбранном поперечном сечении; допустимые значения для медных обмоток, приблизительно, составляют:

$$4,5 \leq i \leq 7 \text{ амп/мм}^2 \quad (259)$$

Для выбранного поперечного сечения получается:

$$i = \frac{I + i_s}{2a} \cdot \frac{1}{q} = \frac{176}{2 \cdot 14,3} = 6,15 \text{ амп/мм}^2 \quad (260)$$

Начертив секцию, мы получим среднюю длину ее витка равной:

$$l_w = 1,22 \text{ м} \dots \dots \dots (261)$$

Суммарная длина проводов якоря равна, следовательно:

$$L_w = 1,22 \cdot 215 = 262 \text{ м} \dots \dots \dots (262)$$

Отсюда получается сопротивление проводов якоря:

$$r_A = \frac{0,0175 \cdot L_w}{4 \cdot q} = \frac{0,0175 \cdot 262}{4 \cdot 14,3} = 0,08 \Omega \dots \dots \dots (263)$$

[в знаменателе — 4, потому, что две ветви, из которых каждая имеет длину, равную половине суммарной длины, параллельно соединены между собою, так как $2a = 2$, ур. (244)].

Для проверки обмотки следует определить также и объем тока согласно ур. (81):

$$A = \frac{(I + i_e) \cdot z}{2a \cdot \pi \cdot d} = \frac{176 \cdot 430}{2 \cdot \pi \cdot 37} = 326 \text{ амп/см} \dots \dots \dots (264)$$

Объем тока не выходит, следовательно, из пределов, предусмотренных ур. (238).

Диаметр коллектора обычно берется несколько меньше диаметра якоря, чем достигается удобное соединение обмотки с пластинами. При этом необходимо следить за тем, чтобы из соображений прочности коллекторное деление не было меньше 4 мм. Окружная скорость коллектора составляет в среднем около 14 м/сек. В машинах с дополнительными полюсами она может быть взята несколько большей (около 17 м/сек), тогда как в машинах без дополнительных полюсов коллектор работает при низких значениях окружной скорости (около 9 м/сек). У быстроходных машин окружная скорость коллектора может дойти до 35 м/сек, однако при этом требуется особенная конструкция коллектора (§ 11).

Выбираем диаметр коллектора равным

$$d_k = 31 \text{ см}, \dots \dots \dots (265)$$

коллекторное деление:

$$t_k = \frac{d_k \cdot \pi}{k} = \frac{31 \cdot \pi}{215} = 0,453 \text{ см} = 4,53 \text{ мм} \dots \dots \dots (266)$$

Коллекторные пластины изолируются одна от другой при помощи прессованной слюды, толщиной в 0,8 мм. Ширина одной пластины, измеренная по окружности коллектора, будет, следовательно, равна

$$b_k = 4,53 - 0,8 = 3,73 \text{ мм} \dots \dots \dots (266a)$$

В стержневых обмотках провод припаивается обычно непосредственно (без промежуточных соединений) к коллекторной пластине. Необходимо поэтому убедиться, выдержит ли пластина в механическом отношении, если по ее ширине выпилить прорез (шириною в 1,3 мм), соответствующий ширине провода (1,1 мм).

Окружная скорость коллектора равна

$$v_k = \frac{d_k \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{0,31 \cdot \pi \cdot 970}{60} = 15,8 \text{ м/сек} \dots \dots \dots (267)$$

При выборе щеток следует прежде всего учитывать напряжение машины. При низких напряжениях применяют мягкие угли с высоким содержанием графита, допускающие большую плотность тока (до 15 амп/см²) и обладающие хорошей проводимостью, так что падение напряжения

в щетках ничтожно (около 1,5 вольт для обеих щеток). В машинах для высоких напряжений применяют твердые угли с большим сопротивлением, что особенно желательно при тяжелых условиях коммутации (§ 8); допустимые плотности тока для этих углей в среднем составляют 6 амп/см², падение напряжения для обеих щеток равно около 1,9 вольт.

Выбираем щетки средней твердости для допустимой плотности тока около 8 амп/см². В этом случае для всех щеток одного знака мы будем иметь контактную поверхность, равную

$$\frac{176}{8} = 22 \text{ см}^2 \dots\dots\dots (268)$$

Ширина щетки в направлении окружности коллектора составляет в среднем от 2 до 3 коллекторных делений:

$$b = 3 \cdot t_k = 3 \cdot 4,53 = 13,6 \approx 15 \text{ мм} \dots\dots\dots (269)$$

Для одной щетки в осевом направлении (фиг. 139) для средних машин ширина колеблется приблизительно между 10 и 25 мм; берем

$$l = 18 \text{ мм} \dots\dots\dots (270)$$

Соответственно числу полюсов предусматриваются 4 щеточных болта с 4 щетками каждый. Таким образом, контактная поверхность всех щеток одного знака будет составлять:

$$2 \cdot 4 \cdot 1,5 \cdot 1,8 = 21,6 \text{ см}^2 \dots\dots (271)$$

Проверяем плотность тока:

$$i_b = \frac{176}{21,6} = 8,15 \text{ амп/см}^2 \dots\dots (272)$$

При определении длины коллектора следует на каждую щетку добавит еще от 2 до 3 мм для держателя; кроме того, следует предусмотреть с каждой стороны запас около 5 мм для осевых перемещений якоря, а также удлинение пластин для присоединения проводов якоря.

Щетки и держатель 4 (18+2) = 80 мм

Запас для осевых перемещений 2 · 5 = 10 "

Для присоединения проводов якоря ≈ 10 "

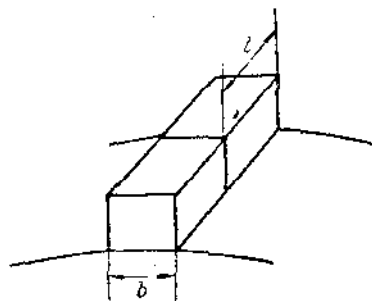
Итого длина коллектора 100 мм

Необходимо проверить также и напряжение между двумя соседними пластинами (§ 7). Среднее напряжение между пластинами, согласно ур. (99), равно

$$e_{sm} = \frac{U \cdot 2p}{k} = \frac{480 \cdot 4}{215} = 8,56 \text{ вольт} \dots\dots\dots (273)$$

Эта величина составляет около 66% от максимального напряжения между пластинами при холостом ходе. Максимальное напряжение можно определить подстановкой вместе U в ур. (273) величину ЭДС из ур. (10) с учетом числа проводов ($\frac{z}{2a}$), при чем для B следует взять максимальное значение индукции в воздухе. Таким образом, максимальное напряжение между пластинами при холостом ходе равно (ур. 223, 225 и 239):

$$e_{so} = \frac{z \cdot P}{k \cdot a} \cdot B_L \cdot l_t \cdot v_A \cdot 10^{-8} = \frac{430 \cdot 2}{215 \cdot 1} \cdot 8150 \cdot 19,5 \cdot 1880 \cdot 10^{-8} = 12 \text{ вольт} \dots\dots (274)$$



Фиг. 139. Щетки.

Так как здесь компенсационная обмотка не предусматривается, то эта величина может возрасти приблизительно в 1,5 раза (18 вольт) из-за искажения поля; однако и эта величина значительно ниже максимально допустимой (35 вольт). Здесь поэтому не приходится опасаться кругового огня на коллекторе.

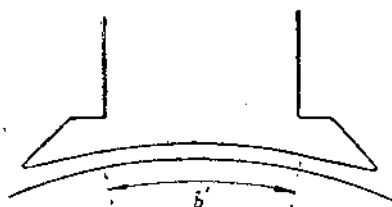
При расчете воздушного зазора стремятся сделать его возможно меньшим, так как главное падение магнитного потенциала происходит в воздушной части магнитной цепи. Для того чтобы искажение поля под полюсным башмаком оставалось в определенных пределах, воздушный зазор не должен быть взят слишком малым (§ 6). Из фиг. 50 видно, что при

$$bA > V_{z+L} \dots \dots \dots (275)$$

индукция у края полюсного башмака имеет обратный знак, чего следует избегать, принимая во внимание использование машины; одновременно с этим следует учитывать значительное возрастание индукции на другом конце полюсного башмака, а следовательно и увеличение потерь в железе зубцов.

В качестве допустимого предела берут

$$\frac{V_{z+L}}{bA} = \frac{2(V_z + V_L)}{bA} \geq 1,2 \dots \dots (276)$$



Фиг. 140. Воздушный зазор под полюсным башмаком.

Очертание полюсного башмака целесообразно выбрать таким, чтобы воздушный зазор был постоянным по величине не по всей полюсной дуге, а лишь по части ее (приблизительно $b' = 0,5\tau$), и, кроме того, расширился по направлению к краям

полюсов (фиг. 140). Этим, с одной стороны, достигается плавное изменение кривой индукции (что полезно с точки зрения ослабления потерь в железе), а с другой стороны, ограничивается реакция якоря, в особенности в части башмака b' под постоянной частью зазора. Подставляя в ур. (276):

$$b = b' = 0,5\tau \text{ см} \dots \dots \dots (277)$$

$$V_z + V_L \cong 1,25 V_L \dots \dots \dots (278)$$

и из ур. (53):

$$V_L = 0,8 \cdot k_c \cdot \delta \cdot B_L \cong 0,9\delta \cdot B_L \text{ амп.} \dots \dots \dots (279)$$

мы получим расчетную формулу для воздушного зазора:

$$\delta = 0,27 \frac{\tau \cdot A}{B_L} \text{ см} = 0,27 \cdot \frac{29 \cdot 326}{8 \cdot 150} = 0,31 \text{ см} \dots \dots \dots (280)$$

Примем:

$$\delta = 0,3 \text{ см} = 3 \text{ мм} \dots \dots \dots (281)$$

Таким образом, диаметр обточки главных полюсов равен

$$370 + 6 = 376 \text{ мм} \dots \dots \dots (282)$$

Магнитная характеристика потока главного полюса. Об определении магнитного напряжения в воздушном зазоре см. § 5. Коэффициент Картера (Carter), учитывающий уменьшение поперечного сечения воздушного зазора из ур. (52) вместе с ур. (255), (281) равен (так как предусмотрены открытые пазы, то ширина входной щели s равна ширине паза $b_n = 9,4$ мм):

$$k_c = \frac{l \cdot (5\delta + b_n)}{l(5\delta + b_n) - b_n^2} = \frac{27(5 \cdot 3 + 9,4)}{27(5 \cdot 3 + 9,4) - 9,4^2} = 1,16 \dots \dots \dots (283)$$

Таким образом, магнитное напряжение в обоих воздушных зазорах равно (ур. 53)

$$2V_L = 1,6 \cdot k_e \cdot \delta \cdot B_L = 1,6 \cdot 1,16 \cdot 0,3 \cdot B_L = 0,56 B_L \quad (284)$$

Для выбранного поля при холостом ходе (ур. 239) мы имеем:

$$2V_L = 0,56 \cdot 8150 = 4560 \text{ амп.} \quad (285)$$

Индукция в железе якоря определяется согласно § 5; однако, так как высота h_A железного пакета якоря при расчете еще неизвестна, то исходят из некоторой средней индукции B_A в железе якоря:

$$B_A = 15000 \text{ гауссов} \quad (286)$$

Из ур. (54), (234) и (240) определяется затем высота пакета:

$$h_A = \frac{\Phi}{1,8 l_e \cdot B_A} = \frac{3,47 \cdot 10^6}{1,8 \cdot 18 \cdot 15000} = 7,15 \text{ см;} \quad (287)$$

принимаем

$$h_A = 7 \text{ см.} \quad (288)$$

Внутренний диаметр железа якоря, таким образом, равен:

$$d_i = d - 2(h_z + h_A) = 37 - 2(3,5 + 7) = 16 \text{ см.} \quad (289)$$

Средняя индукция в железе якоря выразится [ур. (50) и (54)]:

$$B_A = \frac{\Phi}{1,8 \cdot l_e \cdot h_A} = \frac{b_i \cdot l_i \cdot B_L}{1,8 l_e \cdot h_A} = \frac{21,8 \cdot 19,5}{1,8 \cdot 18 \cdot 7} \cdot B_L = 1,88 B_L \quad (290)$$

Магнитное напряжение в железе якоря равно, согласно ур. (55), (56) и (224):

$$V_A = \tau \cdot H_A = 29 \cdot H_A, \quad (291)$$

при чем H_A следует взять для соответствующей величины B_A и кривой намагничивания на фиг. 35.

Для выбранного поля в воздушном зазоре мы имеем при холостом ходе [ур. (239)]

$$B_A = 1,88 \cdot 8150 = 15300 \text{ гауссов} \quad (292)$$

Кроме того, из фиг. 35 получаем:

$$H_A = 21 \text{ амп/см.} \quad (293)$$

Следовательно, согласно ур. (291)

$$V_A = 29 \cdot 21 = 610 \text{ амп.} \quad (294)$$

Об индукциях в зубцах якоря см. § 5: кажущаяся индукция в зубцах B'_{zk} подсчитывается из ур. (61), а коэффициент k_z для определения действительной индукции в зубцах находится из ур. (68). Индукции определяются для трех мест в зубце (головка зубца, его середина и основание)

Головка зубца:

$$d_{zk} = d = 37 \text{ см.} \quad (295)$$

$$B'_{zk} = \frac{\pi d}{\pi d_{zk} - b_N N} \cdot \frac{l_i}{k_E \cdot l_e} \cdot B_L = \frac{\pi \cdot 37}{\pi \cdot 37 - 0,94 \cdot 43} \cdot \frac{19,5}{0,9 \cdot 18} \cdot B_L = 1,86 \cdot B_L, \quad (296)$$

$$k_{zk} = \frac{\pi \cdot d_{zk}}{k_E \cdot (\pi \cdot d_{zk} - b_N \cdot N)} - 1 = \frac{\pi \cdot 37}{0,9 \cdot (\pi \cdot 37 - 0,94 \cdot 43)} - 1 = 0,72 \quad (297)$$

Середина зубца:

$$d_{zm} = d - h_z = 37 - 3,5 = 33,5 \text{ см} \quad (298)$$

$$B'_{zm} = \frac{\pi \cdot 37}{\pi \cdot 33,5 - 0,94 \cdot 43} \cdot \frac{19,5}{16,2} \cdot B_L = 2,17 \cdot B_L \quad (299)$$

$$k_{zm} = \frac{\pi \cdot 33,5}{0,9 (\pi \cdot 33,5 - 0,94 \cdot 43)} - 1 = 0,82 \quad (300)$$

Основание зубца:

$$d_{zf} = d - 2h_z = 37 - 7 = 30 \text{ см} \quad (301)$$

$$B'_{zf} = \frac{\pi \cdot 37}{\pi \cdot 30 - 0,94 \cdot 43} \cdot \frac{19,5}{16,2} \cdot B_L = 2,6 \cdot B_L \quad (302)$$

$$k_{zf} = \frac{\pi \cdot 30}{0,9 (\pi \cdot 30 - 0,94 \cdot 43)} - 1 = 0,95 \quad (303)$$

При помощи кажущейся индукции B'_z и коэффициента k_z можно определить, согласно § 5 и фиг. 35, действительную индукцию в зубце B_z и соответствующее напряжение поля H_z . Магнитное напряжение в зубцах выразится тогда (ур. 70 и 71):

$$\left. \begin{aligned} 2V_z &= 2h_z \cdot \frac{H_{zk} + 4 \cdot H_{zm} + H_{zf}}{6} = \\ &= 7 \cdot \frac{H_{zk} + 4 \cdot H_{zm} + H_{zf}}{6} \end{aligned} \right\} \quad (304)$$

Для выбранного поля в воздухе при холостом ходе получится, следовательно:

$$\left. \begin{aligned} B'_{zk} &= 15200 \text{ гауссов; } B_{zk} = 15200 \text{ гауссов; } H_{zk} = 20 \text{ амп./см} \\ B'_{zm} &= 17700 \text{ " } B_{zm} = 17700 \text{ " } H_{zm} = 100 \text{ " } \\ B'_{zf} &= 21200 \text{ " } B_{zf} = 20700 \text{ " } H_{zf} = 450 \text{ " } \end{aligned} \right\} \quad (305)$$

$$2V_z = 7 \cdot \frac{20 + 400 + 450}{6} = 1010 \text{ амп.} \quad (306)$$

Через поперечное сечение полюсного сердечника, кроме полезного потока Φ , проходит еще значительная часть потока рассеяния Φ_s (§ 5). Для выбранного поля в воздушном зазоре при холостом ходе можно поток рассеяния Φ_s принять равным 15% полезного потока Φ . Построив в координатной системе эту величину в функции от магнитного напряжения в воздухе, якоре и зубцах и проведя прямую через начало координат и эту точку, мы сможем по этой прямой (фиг. 141)

$$\Phi_s = f(\theta) \quad (307)$$

получать величину потока рассеяния, соответствующего любому магнитному напряжению в воздухе, якоре и зубцах.

Поперечное сечение полюса определяется по величине пронизывающего его потока и по выбранной индукции. В качестве средних индукций в полюсах приняты

$$B_m = 12000 \text{ до } 17000 \text{ гауссов} \quad (308)$$

Берем величину

$$B_m = 14000 \text{ гауссов} \quad (309)$$

Поток рассеяния, при заданном поле в воздушном зазоре при холостом ходе, равен

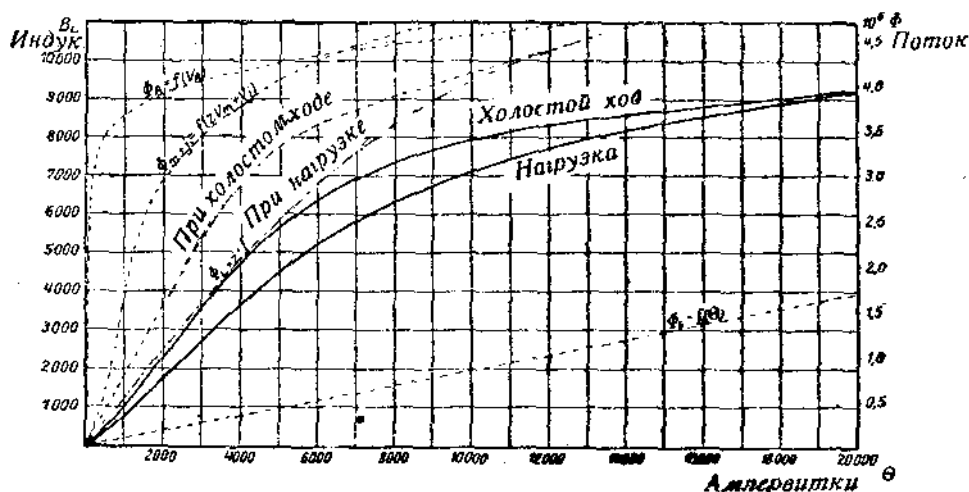
$$\Phi_s = 0,15 \cdot 3,47 \cdot 10^6 = 0,52 \cdot 10^6 \text{ максвелл} \quad (310)$$

Таким образом, суммарный поток в полюсе выразится (ур. 74):

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_s = (3,47 + 0,52) \cdot 10^6 \cong 4,0 \cdot 10^6 \text{ максвелл} \quad (311)$$

Активное сечение железа полюсов составит (ур. 75)

$$Q_m = \frac{\Phi_m}{B_m} = \frac{4,0 \cdot 10^6}{14000} = 285 \text{ см}^2 \quad (312)$$



Фиг. 141. Характеристики.

Полюса спрессовываются из листов железа (§ 11); при подсчете размеров полюса следует поэтому учитывать коэффициент заполнения k_E . Осеая длина полюса уже найдена (ур. 233); она равна $l_p = 21 \text{ см}$; таким образом ширина полюса выразится:

$$b_m = \frac{Q_m}{k_E \cdot l_p} = \frac{285}{0,9 \cdot 21} = 15,1 \cong 15 \text{ см} \quad (313)$$

Окончательное сечение железа полюсов равно, следовательно:

$$Q_m = k_E \cdot b_m \cdot l_p = 0,9 \cdot 15 \cdot 21 = 284 \text{ см}^2, \quad (314)$$

а индукция при выбранном поле в воздушном зазоре для холостого хода

$$B_m = \frac{\Phi_m}{Q_m} = \frac{4,0 \cdot 10^6}{284} = 14100 \text{ гауссов} \quad (315)$$

Соответствующая ей напряженность поля из фиг. 35 равна

$$H_m = 10 \text{ амп/см} \quad (316)$$

Мерой для длины L_m полюса в радиальном направлении является пространство, необходимое для того, чтобы поместить обмотку возбуждения. Потребные ампер-витки принимают равными:

$$\theta = 1,6 \cdot 2V_L \quad (317)$$

и для них рассчитывают обмотку возбуждения (см. ниже). Соответствующий расчет дает для данных условий высоту обмотки, равную

$$h_m = 16,2 \text{ см} \dots \dots \dots (318)$$

К этому следует прибавить еще двойную толщину изоляционного каркаса (2·0,5 см), высоту полюсного башмака (около 1,5 см) и надбавку, учитывающую искривление у основания полюса (около 0,5 см). Таким образом длина пути L_m на фиг. 43 получается равной

$$L_m = 16,2 + 2 \cdot 0,5 + 1,5 + 0,5 = 19,2 \text{ см} \dots \dots \dots (319)$$

Диаметр проточки ярма у основания полюса равен

$$d_j = 37,6 + 2 \cdot 19,2 = 76,0 \text{ см} \dots \dots \dots (320)$$

Магнитное напряжение в полюсах равно (ур. 76)

$$2V_m = 2 \cdot L_m \cdot H_m = 2 \cdot 19,2 \cdot H_m = 38,4 \cdot H_m \dots \dots \dots (321)$$

Следовательно, для выбранного поля при холостом ходе:

$$2V_m = 38,4 \cdot 10 \cong 385 \text{ амп.} \dots \dots \dots (322)$$

При предварительном расчете характеристики холостого хода нецелесообразно определять поток рассеяния для каждой отдельной точки. Поэтому подсчитывают кривую $\Phi_{m+j} = f(2V_m + V_j)$ (§ 5) для любых потоков (целесообразно подсчитывать для тех же потоков, что и для других частичных магнитных напряжений) и строят затем характеристику холостого хода из отдельных кривых (фиг. 44).

При этом предположении мы получим

$$B_m = \frac{\Phi}{Q_m} = \frac{\Phi}{284} \dots \dots \dots (323)$$

Через поперечное сечение ярма проходит половина магнитного потока Φ_m (§ 5). При чугунном яре берут не слишком высокие индукции, так как чугун обладает плохой магнитной проводимостью (фиг. 35); для него можно принять среднее значение индукции равной

$$B_j \cong 8000 \text{ гауссов} \dots \dots \dots (324)$$

Соответствующее поперечное сечение ярма (ур. 77) равно

$$Q_j = 240 \text{ см}^2 \dots \dots \dots (325)$$

Таким образом, получается индукция

$$B_j = \frac{\Phi_m}{2 \cdot Q} = \frac{4,0 \cdot 10^6}{2 \cdot 240} = 8250 \text{ гауссов,} \dots \dots \dots (326)$$

а соответствующая напряженность поля из фиг. 36 равна

$$H_j = 55 \text{ амп/см} \dots \dots \dots (327)$$

При распределении сечений ярма выбирают его ширину в осевом направлении с таким расчетом, чтобы она была больше длины l_j полюса на ширину обмотки возбуждения; благодаря этому создается защита от механических повреждений обмотки возбуждения. Таким образом мы имеем:

ширину кольца ярма	24 см
толщину " "	10 "

При определении внешнего диаметра ярма из ур. (320) следует учесть для основания полюса (фиг. 115) прилив, толщиной около 3 см.

Следовательно,

$$D_j = d_j + 2 \cdot 10 + 2 \cdot 3 = 76 + 20 + 6 = 102 \text{ см} \quad (328)$$

Таким образом, магнитное напряжение в кольце ярма получится из ур. (78) и (79):

$$V_j = \frac{\pi \cdot D_j}{2p} \cdot H_j = \frac{\pi \cdot 102}{4} \cdot H_j = 80 \cdot H_j \quad (329)$$

для выбранного поля в воздушном зазоре при холостом ходе мы получим, следовательно:

$$V_j = 80 \cdot 55 = 4400 \text{ амп.} \quad (330)$$

Для предварительного подсчета характеристики холостого хода исходят при определении падений магнитных напряжений для различных индукций в ярме не из суммарного потока Φ_m , соответствующего заданному полезному потоку, а (как и в полюсах) из любых потоков (практически из полезного потока). Таким образом:

$$B_j = \frac{\Phi}{Q_j} = \frac{\Phi}{240} \quad (331)$$

В процессе расчета встречались два вида уравнений:

1. Специальные уравнения для подсчета одной точки характеристики холостого хода.

2. Общие уравнения для подсчета любых точек частичных характеристик (§ 5).

Уравнения первого вида относятся к состоянию холостого хода машины при индукции в воздухе, равной $B_L = 8150$ гауссов. Прибавив частичные магнитные напряжения согласно ур. (80), мы получим из этих уравнений необходимые ампер-витки при выбранном поле в воздушном зазоре при холостом ходе.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Воздух, ур. (285)} \quad \dots \quad 2V_L = 4560 \text{ амп.} \\ \text{Тело якоря, ур. (294)} \quad \dots \quad V_A = 610 \text{ „} \\ \text{Зубцы, ур. (306)} \quad \dots \quad 2V_z = 1010 \text{ „} \\ \text{Магнитные полюсы, ур. (322)} \quad 2V_m = 385 \text{ „} \\ \text{Ярмо, ур. (330)} \quad \dots \quad V_j = 4400 \text{ „} \end{array} \right\} \quad (332)$$

$$\Theta = \Sigma V = 10865 \text{ амп.}$$

Уравнения второго вида представлены все как функции подбираемой индукции в воздухе или соответствующего потока Φ .

Из этих уравнений подсчитывают различные частичные напряжения для некоторых значений B_L и строят затем, согласно § 5 и фиг. 44, характеристику холостого хода (см. также таблицу на стр. 128 и фиг. 141).

Коммутация тока (ср. также § 8).

В секциях якоря, замыкаемых накоротко щетками, индуктируются ЭДС, замедляющие коммутацию. Эти ЭДС возникают, с одной стороны, из-за изменения силы тока в секции и, с другой стороны, из-за поля якоря, в котором движется коротко-замкнутая секция. При проектировании машины необходимо предварительно рассчитать эти ЭДС (§ 8) и сообразно с этим подобрать обмотки дополнительных полюсов.

Таблица.

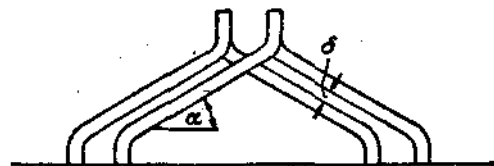
B_z	$\Phi \cdot 10^{-6}$	$2 V_z$	B_A	H_A	V_A	B'_z	B_z	H_z	$\frac{H_{zk} + 4H_{zm} + H_{zf}}{6}$	$2 V_z$	B_m	H_m	$2 V_m$	B_j	H_j	V_j	$2V_m + 2V_j$	$2V_z + 2V_L$
γ_p	(240)	(284)	(290)	$\Phi_{\text{пр.}} 35$	(291)	$\left\{ \begin{matrix} (290) \\ (299) \\ (302) \end{matrix} \right\}$	$\Phi_{\text{пр.}} 35$	$\Phi_{\text{пр.}} 35$	—	(304)	(323)	$\Phi_{\text{пр.}} 35$	(321)	(331)	$\Phi_{\text{пр.}} 35$	(329)		
3 000	1,275	1 680	5,640	1,5	44	$\left\{ \begin{matrix} 5 580 \\ 6 500 \\ 7 800 \end{matrix} \right\}$	— ¹⁾	$\left\{ \begin{matrix} 1,5 \\ 1,6 \\ 1,9 \end{matrix} \right\}$	1,6	11	4 500	1,3	50	1 660	10,0	800	850	1 690
5 000	2,12	2 800	9 400	2,5	73	$\left\{ \begin{matrix} 5 300 \\ 10 800 \\ 13 000 \end{matrix} \right\}$	—	$\left\{ \begin{matrix} 2,5 \\ 3,5 \\ 6,4 \end{matrix} \right\}$	3,8	27	7 500	1,8	70	4 430	14,5	1 160	1 230	2 830
7 000	2,97	3 920	13 150	6,8	197	$\left\{ \begin{matrix} 13 000 \\ 15 200 \\ 18 200 \end{matrix} \right\}$	—	$\left\{ \begin{matrix} 6,4 \\ 20,0 \\ 130,0 \end{matrix} \right\}$	36	250	10 500	3,3	127	5 200	23,0	1 840	1 970	4 170
8 000	3,40	4 470	15 000	17,0	495	$\left\{ \begin{matrix} 14 900 \\ 17 400 \\ 20 800 \end{matrix} \right\}$	—	$\left\{ \begin{matrix} 15,0 \\ 85,0 \\ 400,0 \end{matrix} \right\}$	126	870	12 000	4,7	180	7 100	35,0	2 800	2 980	5 340
9 000	3,82	5 040	16 900	60	1 740	$\left\{ \begin{matrix} 16 800 \\ 19 500 \\ 23 400 \end{matrix} \right\}$	—	$\left\{ \begin{matrix} 60,0 \\ 240,0 \\ 1300,0 \end{matrix} \right\}$	387	2 700	13 500	7,5	290	8 000	48,0	3 920	4 210	7 740

¹⁾ При кажущихся индукциях в зубцах ниже 18 000 гауссов наличие в пазу параллельного пути через воздух становится настолько мало заметным, что для определения напряженности поля можно учитывать эти самые кажущиеся индукции в зубцах.

Если ширина щетки b больше коллекторного деления t_k , то несколько секций одновременно окажутся замкнутыми накоротко щетками; в этом случае, кроме самоиндукции секции, следует учесть еще взаимоиндукцию других секций, одновременно замкнутых накоротко.

Если ширина щетки не является числом, кратным коллекторному делению, то число секций, одновременно замыкаемых накоротко щетками, будет изменяться во времени. Периодически изменяется во времени также (в ступенчатых обмотках) и взаимное расположение этих секций. Суммарная индуктивность не является, следовательно, постоянной величиной; необходимо поэтому принимать во внимание некоторое среднее значение.

Суммарную индуктивность (§ 8) секции для более легкого подсчета разлагают на две части: одну часть, соответствующую потоку рассеяния вокруг лобовых соединений, и другую часть, соответствующую потоку рассеяния в пазах¹⁾.



Фиг. 142. Лобовые соединения проводов якоря.

Среднюю индуктивность, соответствующую лобовому рассеянию, можно подсчитать по формуле:

$$L_{s \text{ средн.}} = 2,55 \cdot \beta \cdot s^2 \cdot l_s \sqrt{\frac{l_s + \tau}{h_1 + \beta \cdot (a_1 + \delta) - \delta}} \cdot 10^{-9} \text{ генри} \quad \dots (333)$$

Здесь β — отношение ширины щетки к коллекторному делению, являющееся мерой для числа секций, одновременно замкнутых накоротко щетками ур. (269) и (266):

$$\beta = \frac{b}{t_k} = \frac{15}{4,53} = 3,31 \quad \dots (334)$$

s — число витков одной секции ($s = 1$); l_s — длина лобовых соединений; средняя длина витка l_w была дана в ур. (26); мы имеем:

$$l_w = 2(l_a + l_s), \quad \dots (335)$$

следовательно,

$$l_s = \frac{l_w}{2} - l_a = \frac{122}{2} - 21 = 40 \text{ см} \quad \dots (336)$$

τ — полюсное деление ур. (224); выше было дано: $h_1 = 1,3 \text{ см}$ — высота голого медного стержня, $a_1 = 0,11$ — его ширина; δ — воздушный промежуток между проводами (секциями) в обмоточных головках. Согласно фиг. 142, мы имеем:

$$\cos \alpha = \frac{\tau}{l_s} = \frac{29}{40} = 0,725 \quad \dots (337)$$

$$\alpha = 45^\circ$$

$$\frac{a_1 + \delta}{\cos \alpha} \cdot w = (d - h_z) \pi \quad \dots (338)$$

$$\left. \begin{aligned} \delta &= (d - h_z) \pi \cdot \frac{\cos \alpha}{w} - a_1 = \\ &= (37 - 3,5) \cdot \pi \cdot \frac{0,725}{215} - 0,11 = 0,245 \text{ см} \end{aligned} \right\} \quad \dots (339)$$

¹⁾ R. Richter. Elektrische Maschinen, 1. 287 ff., 440 ff. Springer, Berlin, 1924.

Таким образом, ур. (333) получит вид:

$$L_{\text{ср.}} = 2,55 \cdot 3,31 \cdot 40 \sqrt{\frac{40 + 29}{1,3 + 3,31(0,11 + 0,245) - 0,245}} \cdot 10^{-9} \approx \left. \begin{aligned} & \approx 0,19 \cdot 10^{-5} \text{ генри} \end{aligned} \right\} . \quad (340)$$

Средняя индуктивность, соответствующая рассеянию пазов, равна

$$L_{N_{\text{ср.}}} = 4 \cdot \pi \cdot s^2 \cdot l_1 \cdot \lambda_{N_{\text{ср.}}} \cdot 10^{-9} \text{ генри} (341)$$

Величина λ_N — число отвлеченное; умножая его на длину якоря и проводимость паза ($0,4 \pi \cdot 10^{-8}$), мы получаем индуктивность одного провода в пазу. Величина λ_N зависит от геометрических размеров паза. Она будет для провода нижнего слоя (благодаря большей сопряженности этого провода с поперечным потоком паза) больше, чем для провода верхнего слоя. Для взаимной индукции величина λ_N имеет другое значение, чем для самоиндукции. Число проводов в одном пазу, одновременно замкнутых щетками, изменяется во времени. Необходимо поэтому хотя бы графически¹⁾ определить длительность взаимодействия двух проводов в данной обмотке и на основе этих данных подсчитать средний коэффициент проводимости $\lambda_{N_{\text{ср.}}}$, соответствующий средней суммарной индуктивности в пазу.

Для рассматриваемой обмотки получилась, таким образом, средняя величина, равная

$$\lambda_{N_{\text{ср.}}} = 17,9 (342)$$

Таким образом, ур. (341) можно написать:

$$L_{N_{\text{ср.}}} = 4\pi \cdot 19,5 \cdot 17,9 \cdot 10^{-9} = 0,44 \cdot 10^{-5} \text{ генри} (343)$$

Среднее значение ЭДС, индуктированной в коротко-замкнутой секции благодаря изменению силы тока, равно (ур. 124):

$$e_{L_{\text{ср.}}} = (L_{N_{\text{ср.}}} + L_{S_{\text{ср.}}}) \cdot \frac{di}{dt} (344)$$

За время коммутации T сила тока в коротко-замкнутой секции меняется от $-\frac{I+i_e}{2a}$ до $+\frac{I+i_e}{2a}$; предполагая прямолинейную коммутацию, мы получим, следовательно:

$$\frac{di}{dt} = \frac{I+i_e}{aT} (345)$$

Длительность коммутации T при петлевой обмотке зависит от ширины щетки b :

$$T = \frac{b}{v_k} , ... (346)$$

где v_k — окружная скорость коллектора.

В волновой обмотке длительность коммутации T , в случае наложения всех $2p$ щеточных комплектов, зависит не от ширины одной щетки. Если отношение числа коллекторных пластин k к числу пар полюсов p — не целое число,

$$\frac{k}{p} = \frac{215}{2} = 107,5, ... (347)$$

¹⁾ R. Richter, там же.

то одинаковые щетки расположены различно относительно коллекторных пластин. На фиг. 68 первая отрицательная щетка, например, перекрывает половину пластины 7 и половину пластины 8, тогда как вторая щетка лежит целиком на 17. Исследуя длительность коммутации, например, секции, идущей через пазы 8 и 13 (считая при этом, что обмотка движется слева направо), мы находим, что начало коммутации имеет место тогда, когда вторая щетка лежит как раз на пластине 18 и начинает прикасаться к пластине 17; при этом первая щетка делится поровну между пластинами 8 и 9; конец коммутации имеет место тогда, когда первая щетка лежит целиком на пластине 7, следовательно, только-что покинула пластину 8; вторая щетка делится при этом пополам между пластинами 16 и 17. Таким образом длительность коммутации будет на половину коллекторного деления больше, чем ширина щетки. В общем виде (учитывая ширину изоляции между пластинами $j = 0,8$ мм) расчетная ширина щетки, характеризующая длительность коммутации, выразится

$$b_j = b - j + \left(1 - \frac{a}{p}\right) t_k = 15 - 0,8 + \frac{4,53}{2} = 16,5 \text{ мм} \quad \dots (348)$$

Согласно ур. (344), (345), (346) и (348) определяется среднее значение ЭДС, индуктированной в коротко-замкнутой секции благодаря изменению силы тока:

$$\left. \begin{aligned} e_{L_{\text{сред.}}} &= \frac{I + I_e}{a} \cdot \frac{v_k}{b_j} (L_{N_{\text{сред.}}} + L_{S_{\text{сред.}}}) = \\ &= \frac{176}{1} \cdot \frac{1580}{1,65} (0,19 + 0,44) \cdot 10^{-5} = 1,06 \approx 1,1 \text{ вольт} \end{aligned} \right\} \dots (349)$$

Для уничтожения этой вредной ЭДС необходимо путем возбуждения дополнительных полюсов создать соответствующую индукцию в зоне коммутации, в которой находятся замкнутые щетками секции. Вредное для коммутации действие поля якоря уничтожается тем, что дополнительному полюсу придаются добавочные ампер-витки, соответствующие ампер-виткам якоря.

Под шириной зоны коммутации подразумевается часть окружности якоря (отнесенная к статору машины), внутри которой провода секции могут еще находиться в состоянии короткого замыкания щетками. Эта ширина обуславливает ширину башмака дополнительного полюса. Поэтому стремятся обмотку якоря проектировать так, чтобы зона коммутации была возможно более узкой. Ширина зоны коммутации может быть определена графически. Для этого вычерченную обмотку передвигают мимо щеток, предполагаемых неподвижными, и отмечают границы, внутри которых секционные стороны выбранного пазового слоя передвигаются коротко-замкнутыми в воздушных зазорах под разными полюсами. Наложив зону проводов верхнего слоя одного паза на зону проводов нижнего слоя того же паза, мы получим крайние пределы ширины зоны коммутации. Путем подсчета ширину зоны коммутации можно определить из следующего уравнения¹⁾:

$$b_{w_2} = (b - j) \frac{d}{a_k} + \left(1 + \frac{N}{2p} - \frac{y_1}{u} - \frac{a}{up}\right) t \dots (350)$$

Здесь первый член представляет собою ширину щетки, приведенную к окружности якоря (за вычетом изоляции между пластинами j), N — число пазов, p — число пар полюсов, y_1 — ширина секции, выраженная в шагах по коллектору (ур. 252), u — число секционных сторон, лежащих рядом в одном пазу, a — число пар параллельных ветвей и t — пазовое деление.

¹⁾ R. Richter. Ankerwicklungen, S. 110. Springer, Berlin. 1920.

Таким образом мы имеем:

$$b_{ws} = (15 - 0,8) \frac{370}{310} + \left(1 + \frac{43}{4} - \frac{53}{5} - \frac{1}{5 \cdot 2}\right) \cdot 27 = 45,4 \approx 46 \text{ мм} \dots (351)$$

Сообразно с этим выбирают расчетную ширину полюсного башмака

$$b_{wi} \approx b_{ws} = 46 \text{ мм} = 4,6 \text{ см} \dots (352)$$

Длину башмака дополнительного полюса берут обычно равной длине башмака главного полюса (ур. 233)

$$l_w = l_p = 210 \text{ мм} = 21 \text{ см} \dots (353)$$

Расчетная длина якоря, отнесенная к длине башмака дополнительного полюса, равна (ур. 49)

$$l_{wi} = \frac{l_w + l_s}{2} = \frac{21 + 18}{2} = 19,5 \text{ см} \dots (354)$$

Индукция в воздушном зазоре, необходимая для создания в короткозамкнутой секции ЭДС, равную и направленную противоположно ЭДС от изменения силы тока (ур. 349), — определяется из ур. (10):

$$B_{Lw} = \frac{e_{Lсек}}{2 \cdot s \cdot v_A \cdot l_{wi}} \cdot 10^8 \text{ гауссов}, \dots (355)$$

где s — число витков ($s=1$) в короткозамкнутой секции, $2s$ — число проводов в ней, v_A — окружная скорость якоря из ур. (223) и l_{wi} — расчетная длина якоря.

Таким образом:

$$B_{Lw} = \frac{1,1 \cdot 10^8}{2 \cdot 1 \cdot 880 \cdot 19,5} = 1500 \text{ гауссов} \dots (356)$$

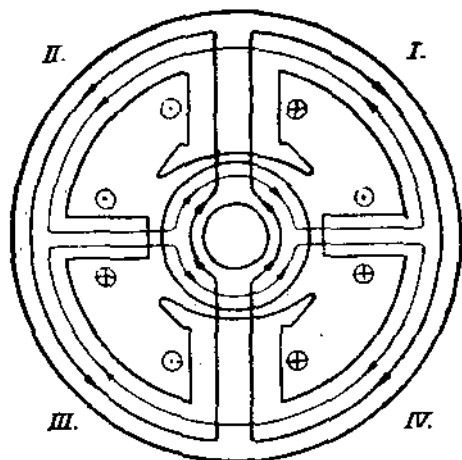
Поток дополнительного полюса, следовательно, равен

$$\Phi_w = B_{Lw} \cdot l_{wi} \cdot b_{wi} = 1500 \cdot 19,5 \cdot 4,6 = 0,135 \cdot 10^8 \text{ максвеллов} \dots (357)$$

Цепь дополнительного полюса.

Поток в цепи дополнительного полюса проходит по таким же путям, как и главный поток. В ярме и в якоря оба потока налагаются друг на друга. В квадрантах II и IV потоки складываются, тогда как в квадрантах I и III

они направлены противоположно друг другу, следовательно, главный поток ослабляется на величину дополнительного потока (фиг. 143). То же действительно и для соответствующих индукций. Таким образом, благодаря дополнительному потоку индукции в ярме и в якоря по пути интегрирования будут в одной половине усиливаться на определенную величину, а в другой половине — уменьшаться на ту же величину. Однако, усиление напряженности поля в первой части благодаря насыщению железа будет больше, чем уменьшение во второй части. Поэтому благодаря дополнительному потоку имеет место увеличение потребного числа ампер-витков в главной цепи, которое необходимо подсчитать для каждого отдельного случая.



Фиг. 143. Сложение потоков главного и дополнительного полюсов.

Так как результирующий поток имеет направление большого главного потока, то путь интегрирования дополнительного потока будет проходить частью по направлению результирующей индукции, частью же противоположно ей; соответствующие напряженности полей необходимо поэтому вычитать друг от друга.

Воздушный зазор под башмаком дополнительного полюса берется несколько большим, чем под башмаками главных полюсов, так как поле якоря достигает в нейтральной зоне своего максимального значения и при малом зазоре можно ожидать сильную вогнутость кривой дополнительного полюса:

$$\delta_w = 0,4 \text{ см} \dots \dots \dots (358)$$

Коэффициент Картера равен согласно ур. (52):

$$k_{cw} = \frac{t(5\delta + s)}{t(5\delta + s) - s^2} = \frac{27(5 \cdot 4 + 0,4)}{27(5 \cdot 4 + 0,4) - 9,4^2} = 1,13 \dots \dots (359)$$

Таким образом, магнитное напряжение в воздушном зазоре равно (ур. 53):

$$2V_{Lw} = 1,6 \cdot \delta_w \cdot k_{cw} \cdot B_{wL} = 1,6 \cdot 0,4 \cdot 1,13 \cdot 1500 = 1080 \text{ амп.} \dots \dots (360)$$

При определении магнитного напряжения в зубцах достаточно (так как индукция в воздушном зазоре незначительна) подсчитать индукцию в середине зубца и полученную величину принять в качестве средней для всего зубца. Из ур. (61) мы имеем:

$$\left. \begin{aligned} B_{zw_m}' &= B_{zw_m} = \frac{\pi d}{\pi(d - h_z) - b_N \cdot N} \cdot \frac{l_{wL}}{0,9 \cdot l_s} \cdot B_{wL} = \\ &= \frac{\pi \cdot 37 \cdot 10,5 \cdot 1500}{(\pi \cdot 33,5 - 0,94 \cdot 43) \cdot 0,9 \cdot 18} = 3270 \text{ гауссов} \end{aligned} \right\} \dots \dots (361)$$

Из фиг. 35 мы получаем соответствующую величину

$$H_{zw_n} = 1,1 \text{ амп/см,} \dots \dots \dots (362)$$

следовательно:

$$2V_{zw} = 2h_z \cdot H_{zw_n} = 2 \cdot 3,5 \cdot 1,1 = 7,7 \approx 10 \text{ амп.} \dots \dots \dots (363)$$

Для одного только потока в цепи дополнительного полюса мы получили бы индукцию в якоре, согласно ур. (54):

$$B_{Aw} = \frac{\Phi_w}{1,8 \cdot l_s \cdot h_A} = \frac{135000}{1,8 \cdot 18 \cdot 7} = 595 \approx 600 \text{ гауссов} \dots \dots \dots (364)$$

Результирующие индукции в теле якоря, учитывая взаимодействие с главным потоком, будут равны (ур. 292):

для квадрантов II и IV (фиг. 143):

$$B_A + B_{Aw} = 15300 + 600 = 15900 \text{ гауссов,}$$

чему соответствует

$$H_A' = 32 \text{ амп/см,}$$

для квадрантов I и III:

$$B_A - B_{Aw} = 15300 - 600 = 14700 \text{ гауссов,}$$

чему соответствует

$$H_A'' = 14 \text{ амп/см.}$$

} \dots \dots \dots (365)

Так как обе части пути имеют одинаковую длину, то можно рассчитывать по среднему напряжению поля. Для главного потока это напряжение составляет

$$H_{Am} = \frac{H_A' + H_A''}{2} = \frac{46}{2} = 23 \text{ амп/см} \quad (366)$$

При подсчете характеристики холостого хода (ур. 293) было принято напряжение поля, равное 21 АВ/см. Небольшой разницей можно пренебречь

$$H_{Am} = \frac{H_A' - H_A''}{2} = \frac{18}{2} = 9 \text{ амп/см} \quad (367)$$

следовательно, из ур. (291)

$$V_{Aw} = 29 \cdot 9 \approx 260 \text{ амп.} \quad (368)$$

Поток, проходящий через поперечное сечение сердечника дополнительного полюса, больше потока дополнительного полюса, подсчитанного из ур. (357), на величину потока рассеяния. Благодаря большему воздушному зазору и малой ширине полюса рассеяние здесь больше, чем у главного потока. Принимаем рассеяние в 25%. Таким образом, поток в сердечнике дополнительного полюса будет равен

$$\Phi_{mw} = 1,25 \Phi_w = 1,25 \cdot 0,135 \cdot 10^6 = 0,169 \cdot 10^6 \text{ максвеллов} \quad (369)$$

Индукцию в дополнительном полюсе выбирают меньшей, чем в главном полюсе, для того, чтобы характеристика дополнительного полюса оставалась по возможности ненасыщенной, иначе говоря, чтобы поток дополнительного полюса изменялся пропорционально току в якоре.

В рассматриваемом случае из одних только механических соображений приходится взять ширину дополнительного полюса равной 3,5 см. Таким образом, индукция в керне дополнительного полюса равна

$$B_{mw} = \frac{\Phi_{mw}}{0,9 \cdot 3,5 \cdot l_w} = \frac{16900}{0,9 \cdot 3,5 \cdot 21} = 2500 \text{ гауссов} \quad (370)$$

$$H_{mw} = 1 \text{ амп/см} \quad (371)$$

Длина пути индукционной линии такая же, как и у главного полюса; следовательно:

$$2V_{mw} = 1 \cdot 2 \cdot 19,2 \approx 40 \text{ амп.} \quad (372)$$

Индукция в ярме только для добавочного потока равнялась бы

$$B_{jw} = \frac{\Phi_{mw}}{2 \cdot Q_j} = \frac{16900}{2 \cdot 240} \approx 350 \text{ гауссов} \quad (373)$$

Учитывая взаимодействие с главным потоком, мы получим

для квадрантов II и IV (фиг. 143):

$$B_j + B_{jw} = 8250 + 350 = 8600 \text{ гауссов;}$$

$$H_j' = 60 \text{ амп/см}$$

для квадрантов I и III:

$$B_j - B_{jw} = 8250 - 350 = 7900 \text{ гауссов;}$$

$$H_j'' = 50 \text{ амп/см}$$

..... (374)

Средняя напряженность поля для главного потока равно, следовательно:

$$H_{jm} = \frac{H_j' + H_j''}{2} = \frac{60 + 50}{2} = 55 \text{ амп/см} \quad (375)$$

Для этого значения (ур. 327) подсчитана и характеристика холостого хода.

Средняя напряженность поля в ярме для потока дополнительного полюса равна:

$$H_{jm} = \frac{H_j' - H_j''}{2} = \frac{60 - 50}{2} = 5 \text{ амп/см.}$$

Магнитное напряжение следовательно, равно:

$$V_{jm} = 5 \cdot 80 = 400 \text{ амп.} \quad (376)$$

Таким образом, суммарные ампер-витки дополнительного полюса, необходимые для создания в коротко-замкнутых щетками секциях некоторой ЭДС движения равной и противоположной ЭДС коммутации (ур. 349), получатся следующим образом:

Воздушный зазор, (ур. 360) . . .	$2V_{Lw} =$	1 080	амп.	(377)	
Зубцы, (ур. 363)	$2V_{Zw} =$	10	"		
Тело якоря, (ур. 368)	$V_{Aw} =$	260	"		
Сердечник полюса, (ур. 372) . . .	$2V_{mw} =$	40	"		
Ярмо, (ур. 376)	$V_{jw} =$	400	"		
			$\Sigma V_w =$	1 790	амп.

К этому следует прибавить еще ампер-витки, противоположные ампер-виткам якоря, необходимые для ослабления поля якоря в зоне коммутации. Ампер-витки якоря, отнесенные к одной паре полюсов, равны

$$\Theta_A = \frac{w \frac{I + I_e}{2a}}{p} = \frac{215 \cdot 176}{4} = 9500 \text{ амп.} \quad (378)$$

Таким образом, суммарные ампер-витки для цепи дополнительного полюса равны

$$\Theta_w = 9500 + 1790 \approx 11300 \text{ амп.} \quad (379)$$

Для них и рассчитывается обмотка дополнительных полюсов. Так как через последнюю проходит ток якоря (§ 8), то число витков одного дополнительного полюса будет равно (ур. 190):

$$w_w = \frac{1}{2} \frac{\Theta_w}{I + I_e} = \frac{11300}{2 \cdot 176} \approx 32 \text{ витка/полюс} \quad (380)$$

Плотность тока для обмотки дополнительных полюсов колеблется между 2,5 и 4 амп/мм².

Принимаем:

$$i_w = 2,5 \text{ амп/мм}^2 \quad (381)$$

Отсюда получается поперечное сечение обмотки дополнительного полюса (ур. 189), равное

$$q_w = \frac{176}{2,5} = 70 \text{ мм}^2 \quad (382)$$

Выбираем полосовую медь (§ 11) $70 \times 1,1 \text{ мм}^2$.

Среднюю длину витка определяем из боковых длин поперечного дополнительного полюса и некоторой величины, характеризующей толщину обмотки:

$$l_{mw} = 2 \cdot 21 + 2 \cdot 3,5 + \sim 9 = 58 \text{ см} = 0,58 \text{ м.} \quad (402)$$

Суммарная длина проводника обмотки дополнительного полюса равна

$$L_w = l_{mw} \cdot 2p \cdot w_w = 0,58 \cdot 4 \cdot 32 = 74 \text{ м} \quad (384)$$

Сопротивление:

$$r_w = \rho \cdot \frac{L_w}{q} = \frac{0,0175 \cdot 74}{70 \cdot 1,0} = 0,0185 \Omega \quad (385)$$

Для практических целей методы точного определения потребных ампер-витков дополнительного полюса слишком сложны.

Опыт показал, что величина

$$\vartheta = \frac{\text{ампер-витки дополнительных полюсов}}{\text{ампер-витки якоря}} \quad (386)$$

колеблется в пределах

$$1,18 \leq \vartheta \leq 1,3 \quad (387)$$

Для рассматриваемого случая:

$$\vartheta = \frac{2p \cdot w_w \cdot (I + i_e)}{w_A \cdot \left(\frac{I + i_e}{2a} \right)} = \frac{4ap \cdot w_w}{w_A} = \frac{4 \cdot 2 \cdot 32}{215} = 1,19 \quad (388)$$

Если выбрать ϑ в пределах, указанных в ур. (387), то для нормальных условий увеличением или уменьшением числа железных прокладок под дополнительными полюсами (чем достигается изменение воздушного зазора, а тем самым и магнитного сопротивления цепи дополнительного полюса) можно добиться безыскровой работы.

После того, как определены обмотки и их сопротивления, можно проверить величину ЭДС, которая в начале расчета была определена по приближенным формулам (ур. 212 и 242). Предполагая увеличение сопротивления во время работы приблизительно в 24% (что соответствует нагреванию в 50°С при температуре окружающей среды в 30°С), мы получим падение напряжения:

в обмотке якоря:

$$1,24 \cdot (I + i_e) \cdot r_A = 1,24 \cdot 176 \cdot 0,08 = 17,50 \text{ вольт}$$

в обмотке дополнительных полюсов:

$$1,24 \cdot (I + i_e) \cdot r_w = 1,24 \cdot 176 \cdot 0,0185 = 4,04 \text{ „}$$

под щетками (см. выше): $\approx 2,00 \text{ „}$

$$\text{Суммарное падение напряжения } e = 23,5 \text{ вольт}$$

Таким образом, индуктированная ЭДС составляет

$$E = U + e = 460 + 23,5 \approx 484 \text{ вольт} \quad (389)$$

В первом приближении из ур. (242) мы получили 480 вольт. Необходимо соответственно увеличить поток и индукцию. Таким образом окончательная величина потока равна

$$\Phi = 3,47 \cdot 10^8 \frac{484}{480} = 3,5 \cdot 10^8 \text{ максвеллов,} \quad (390)$$

а индукция в воздушном зазоре

$$B_L = 8150 \cdot \frac{484}{480} = 8240 \text{ гауссов} \quad (391)$$

Падение напряжения из-за искажения поля определяется из построения, приведенного в § 6 и на фиг. 50; таким путем находят нагрузочную характеристику машины (фиг. 141). Объем тока под полюсным башмаком, являющийся мерой искажения поля, равен, учитывая ур. (277):

$$b'A = 0,5 \cdot \tau \cdot A = 0,5 \cdot 29 \cdot 326 = 4727 \approx 5000 \text{ амп.} \quad (392)$$

Округлением учитывается увеличение искажения поля в расширенной части воздушного зазора, образующейся благодаря скашиванию краев полюса вверх.

Из нагрузочной характеристики для индукции в воздухе $B_L = 8240$ гауссов мы получаем число ампер-витков в цепи главного полюса, потребных при номинальной мощности

$$\Theta = 14200 \text{ амп.} \quad (393)$$

Согласно § 65 норм REM, обмотка возбуждения генератора должна быть рассчитана так, чтобы при номинальном числе оборотов и номинальной мощности на зажимах машины последняя имела бы напряжение, большее номинального на 5%; следовательно:

$$U' = 1,05 U = 1,05 \cdot 460 = 483 \text{ вольт} \quad (394)$$

При том же токе падение напряжения будет такое же, как и при номинальном напряжении (ур. 389); следовательно:

$$E' = 483 + 23,5 = 506,5 \text{ вольт} \quad (395)$$

Соответствующая индукция в воздушном зазоре равна

$$B'_L = 8240 \frac{506,5}{484} = 8610 \text{ гауссов} \quad (396)$$

Для этой величины получается из нагрузочной характеристики

$$\Theta' = 16300 \text{ амп.} \quad (397)$$

Следует также обратить внимание на то обстоятельство, что и у зажимов обмотки возбуждения мы имеем большее напряжение U' . Согласно ур. (194), мерой для поперечного сечения обмотки возбуждения является отношение

$$\frac{\Theta'}{U'} = \frac{16300}{483} = 33,7 \text{ амп/вольт} \quad (398)$$

Согласно § 69 норм REM, обмотка возбуждения должна с другой стороны быть так рассчитана, чтобы при 25-процентной перегрузке можно было еще сохранить номинальное напряжение на зажимах; сила тока равна

$$176 \cdot 1,25 = 220 \text{ амп.} \quad (399)$$

Падение напряжения при этом равно

$$e'' = 220 \cdot 1,24 (0,08 + 0,0185) + 2 = 29 \text{ вольт} \quad (400)$$

Следовательно, ЭДС равна

$$E'' = 460 + 29 = 489 \text{ вольт,} \quad (401)$$

а соответствующая индукция:

$$B_L'' = 8240 \frac{483}{484} = 8340 \text{ гауссов} \quad (402)$$

Для этой перегрузки, соответственно большей линейной нагрузки A , необходимо построить новую нагрузочную характеристику, из которой можно получить требуемое число ампер-витков

$$\Theta'' \approx 15500 \text{ амп.} \dots \dots \dots (403)$$

Напряжение у зажимов обмотки возбуждения равно U ; следовательно

$$\frac{\Theta''}{U} = \frac{15500}{460} = 33,7 \text{ амп/вольт} \dots \dots \dots (404)$$

Отношение такое же, как и в ур. (398); в малых и средних машинах последнее предписание норм имеет обыкновенно перевес при расчете обмотки возбуждения.

В каждом отдельном случае следует делать проверку в отношении обоих предписаний.

Обмотка шунтового возбуждения при номинальном напряжении должна быть, следовательно, рассчитана на

$$\Theta_{\max} = 15500 \text{ амп.} \dots \dots \dots (405)$$

Для надежности берется запас, приблизительно, в 10%. Поперечное сечение обмотки возбуждения подсчитывается из ур. (194). Из размеров поперечного сечения полюсного сердечника получают среднюю длину провода

$$l_m = 0,85 \text{ м} \dots \dots \dots (406)$$

Для величины ρ следует взять удельное сопротивление нагретой меди:

$$\rho = 0,0175 \cdot 1,24 = 0,0217 \frac{\Omega \cdot \text{м}}{\text{мм}^2} \dots \dots \dots (407)$$

Пусть все обмотки возбуждения соединены последовательно, следовательно, $a = 1$. Тогда поперечное сечение провода (ур. 194) равно

$$q_e = \rho \cdot \frac{\rho}{a} \cdot \frac{\Theta_{\max}}{U} \cdot l_m = \frac{0,0217 \cdot 2 \cdot 15500 \cdot 1 \cdot 0,85}{460} = 1,36 \text{ мм}^2 \dots \dots (408)$$

Так как сечение мало, то выбирают круглый провод

$$d = 1,3 \text{ мм } \varnothing \dots \dots \dots (409)$$

Поперечное сечение

$$q_e = \frac{\pi d^2}{4} = 1,3^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 1,33 \text{ мм}^2 \dots \dots \dots (410)$$

Плотность тока для шунтовых обмоток возбуждения колеблется приблизительно между 1,2 и 2,5 амп/мм²; выбираем

$$a_e = 2,5 \text{ амп/мм}^2 \dots \dots \dots (411)$$

отсюда ток возбуждения получается равным:

$$i_e = a_e \cdot q_e = 2,5 \cdot 1,33 = 3,32 \text{ амп.} \dots \dots \dots (412)$$

(выше при предварительном подсчете было взято 2 амп.). Число витков шунтовой обмотки равно (ур. 191):

$$w_e = \frac{\Theta}{2 \cdot i_e} = \frac{14200}{2 \cdot 3,32} = 2140 \frac{\text{витков}}{\text{полюсов}} \dots \dots \dots (413)$$

Суммарная длина провода шунтовой обмотки равна

$$L_e = 2\rho \cdot w_e \cdot l_m = 4 \cdot 2140 \cdot 0,85 = 7300 \text{ м} \dots \dots \dots (414)$$

Сопротивление равно

$$r_e = \frac{0,0175 \cdot 7 \cdot 300}{1,33} = 96 \, \Omega \quad (415)$$

Максимальный потребный ток возбуждения равен

$$i_{e \max} = \frac{\theta_{\max}}{2 \cdot w} = \frac{15 \cdot 500}{2 \cdot 2140} = 3,62 \text{ амп.} \quad (416)$$

Максимальный достигаемый ток возбуждения равен

$$i'_{e \max} = \frac{U}{1,24 \cdot r_e} = \frac{460}{1,24 \cdot 96} = 3,86 \text{ амп.} \quad (417)$$

Имеется, следовательно, еще некоторый запас. Ток возбуждения из ур. (417) получается, если присоединить обмотку возбуждения непосредственно к напряжению у зажимов; при нормальной работе требуется меньший ток возбуждения согласно ур. (412). Поэтому необходимо часть напряжения у зажимов поглотить в предварительном сопротивлении (фиг. 99).

Вес меди.

Вес меди обмоток определяется из уравнения

$$G = q \cdot L \cdot v \cdot 10^{-3} \text{ кг,} \quad (418)$$

где q — поперечное сечение провода в см^2 , L — суммарная длина провода в см и $v = 8,9 \text{ г/см}^3$ — удельный вес меди. Таким образом, суммарный вес меди в обмотке якоря равен

$$G_A = 0,143 \cdot 26 \cdot 200 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 33,3 \text{ кг} \quad (419)$$

Вес меди в обмотке дополнительных полюсов

$$G_w = 0,7 \cdot 7 \cdot 400 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 43,5 \text{ кг} \quad (420)$$

Вес меди в обмотках главных полюсов

$$G_e = 0,0133 \cdot 730 \cdot 000 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 86 \text{ кг} \quad (421)$$

Потери.

А. Потери в меди (см. § 9).

Электрические потери в обмотке якоря составляют, согласно ур. (136):

$$V_A = I_A^2 R_A = (I + i_e)^2 \cdot 1,24 \cdot r_A = (174 + 3,32)^2 \cdot 1,24 \cdot 0,08 = 3100 \text{ ватт} \quad (422)$$

Переходные потери в щетках, предполагая, что падение напряжения в обеих щетках составляет около 2 вольт, равны

$$V_B = U_B \cdot I_A = 2 \cdot 177 \approx 350 \text{ ватт} \quad (423)$$

Потери в обмотках дополнительных полюсов

$$V_w = 177^2 \cdot 1,24 \cdot 0,0185 = 720 \text{ ватт,} \quad (424)$$

а в обмотках шунтового возбуждения

$$V_e = i_e^2 \cdot 1,24 \cdot r_e = 3,32^2 \cdot 1,24 \cdot 96 = 1320 \text{ ватт} \quad (425)$$

Для определения коэффициента полезного действия машины к потерям на возбуждение следует причислить еще и потери в предварительных сопротивлениях; таким образом, потери на возбуждение в шунтовой машине составляют

$$V_e = U \cdot i_e = 460 \cdot 3,32 = 1540 \text{ ватт} \quad (426)$$

Добавочные потери учитываются нормами в виде прибавки к полученным потерям 1% от номинальной мощности.

В. Потери в железе (§ 9).

Удельные потери на перемагничивание (закрывающие в себе потери на гистерезис и вихревые токи), отнесенные к 1 кг железа, составляют, согласно ур. (144):

$$v = \left[\epsilon \frac{f}{100} + \sigma \left(\frac{f}{100} \right)^2 \right] \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \text{ ватт/кг, ... (427)}$$

где ϵ и σ — постоянные для взятых сортов железа, являющиеся мерой для потерь на гистерезис и вихревые токи [для обыкновенного динамного железа, толщиной в 0,5 мм, $\epsilon = 4,4$ и $\sigma = 5,6$ (§ 9)], f — частота перемагничивания (ур. 214) и B — соответствующая индукция.

Максимальная индукция в теле якоря равна (ур. 365):

$$B_A' = B_A + B_{Aw} = 15300 \frac{484}{480} + 600 = 16000 \text{ гауссов . . . (428)}$$

Таким образом, удельные потери в теле якоря составляют (ур. 427):

$$v_A = \left[4,4 \cdot \frac{32,3}{100} + 5,6 \left(\frac{32,3}{100} \right)^2 \right] 1,6^2 = 5,1 \text{ ватт/кг. (429)}$$

Вес якоря из ур. (145) равен

$$\begin{aligned} P_A &= v \cdot k_E \cdot \pi \left[\left(\frac{d}{2} - h_z \right)^2 - \left(\frac{d_i}{2} \right)^2 \right] \cdot l_e \cdot 10^{-3} = \\ &= 7,8 \cdot 0,9 \cdot \pi [(18,5 - 3,5)^2 - 8^2] \cdot 18 \cdot 10^{-3} = 64 \text{ кг} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \text{ (430)}$$

Расчетные потери в железе якоря равны, следовательно:

$$V_A' = P_A \cdot v_A = 64 \cdot 5,1 \approx 330 \text{ ватт (431)}$$

Действительная индукция в поперечном сечении зубца, удаленном от наиболее узкого места зубца на $\frac{1}{3}$ его высоты, составляет

$$\begin{aligned} B_z'' &= \frac{\pi d}{\pi \left(d - 2 \cdot \frac{2}{3} h_z \right) - b_N \cdot N} \cdot \frac{l_i}{k_E \cdot l_e} \cdot B_L = \\ &= \frac{\pi \cdot 37}{\pi \cdot 32,3 - 0,94 \cdot 43} \cdot \frac{19,5}{0,9 \cdot 18} \cdot 8240 = 18400 \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \text{ (432)}$$

$$B_z'' = 18300 \quad \text{. (432a)}$$

Удельные потери:

$$v_z = [4,4 \cdot 0,323 + 5,6 (0,323)^2] \cdot 1,83^2 = 6,7 \text{ ватт/кг (433)}$$

Вес железа зубцов (ур. 146):

$$\begin{aligned} P_z &= v \cdot k_E [(d - h_z) \pi - N \cdot b_N] \cdot h_z \cdot l_e \cdot 10^{-3} = \\ &= 7,8 \cdot 0,9 \cdot [(37 - 3,5) \pi - 43 \cdot 0,94] \cdot 3,5 \cdot 18 \cdot 10^{-3} = 28,5 \text{ кг} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \text{ . . . (434)}$$

Таким образом, расчетные потери в зубцах равны

$$V_z' = P_z \cdot v_z = 28,5 \cdot 6,7 \approx 180 \text{ ватт (435)}$$

Благодаря обработке якоря и отклонению кривой поля от синусоидальной формы потери в железе увеличиваются (§ 9); для учета этого обстоятельства расчетная величина потерь в железе умножается на опытный коэффициент 2.

Таким образом действительные потери в железе равны (ур. 147),

$$V_{A+Z} \approx 2(V_A' + V_Z') = 2(330 + 180) = 1020 \text{ ватт} \dots (436)$$

Удельные потери на поверхности полюсов равны (ур. 150)

$$v_0 = k_0 \left(\frac{N \cdot \pi}{10000} \right)^{1.5} \left(\frac{B_0 \cdot t}{1000} \right)^2 \text{ ватт/см}^2 \dots (437)$$

При полюсных башмаках, собранных из листов, толщиной в 0,55 мм, коэффициент k_0 берется равным 2,8 (§ 9). Амплитуда колебания индукции в воздушном зазоре благодаря наличию пазов составляет около

$$B_0 = 0,27 \cdot B_L \dots (438)$$

Удельные потери на поверхности полюсных башмаков равны, следовательно (ур. 437):

$$v_0 = 2,8 \left(\frac{43 \cdot 970}{10000} \right)^{1.5} \left(\frac{0,27 \cdot 8240 \cdot 2,7}{1000} \right)^2 \cdot 10^{-4} = 0,087 \text{ ватт/см}^2 \dots (439)$$

Суммарные потери на поверхности полюсных башмаков равны (ур. 151)

$$V_0 \approx 2p \cdot v_0 \cdot b_t \cdot l_p = 4 \cdot 0,087 \cdot 21,8 \cdot 21 = 160 \text{ ватт} \dots (440)$$

С. Потери на трение.

К этим потерям относятся потери от трения в подшипниках, под щетками и трение о воздух. Они поддаются лишь приблизительному учету (§ 9) и сильно зависят от состояния машины. Потери на трение составляют обычно от 1 до 2% от мощности машины.

Принимаем: 1,5%.

$$V_R = 0,015 \cdot 80000 = 1200 \text{ ватт} \dots (441)$$

Потери на вентиляцию принимаем:

$$V_L = 350 \text{ ватт} \dots (442)$$

Коэффициент полезного действия определяется из ур. (152). Сумма отдельных потерь составляет:

Потери в меди обмотки якоря, ур. (422)	3100 ватт
Переходные потери под щетками, ур. (423)	350 „
Потери в меди обмоток дополнительных полюсов, ур. (424)	720 „
„ „ „ возбуждения и в предварительном сопротивлении, ур. (426)	1540 „
1% на добавочные потери по нормам	800 „
Потери в железе в теле якоря и в зубцах, ур. (436)	1020 „
„ на поверхности полюсных башмаков, ур. (440)	160 „
„ на трение, ур. (441)	1200 „
„ на вентиляцию, ур. (442)	350 „

Суммарные потери $V = 9240$ ватт.

Коэффициент полезного действия, согласно ур. (152), выразится:

$$\eta = \frac{N}{N + V} = \frac{80000}{80000 + 9240} = 0,896 \dots (443)$$

При предварительном расчете коэффициент полезного действия получился равным (см. в начале параграфа)

$$\eta = 90\%.$$

В. Синхронная машина переменного тока ¹⁾.

§ 1. Переменный ток ²⁾.

Переменным током, вообще говоря, называется ток, меняющий во времени свое направление и величину. Если это изменение происходит в равные промежутки времени по одному закону, то речь идет о периодическом переменном токе. Наиболее простой периодический переменный ток является синусоидальной функцией времени и представляется уравнением:

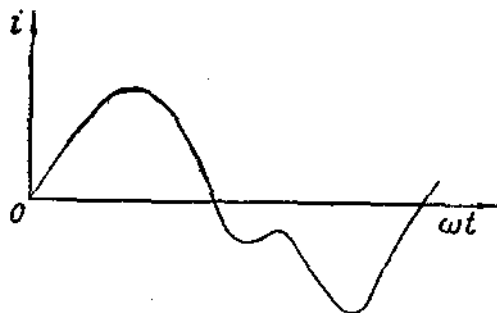
$$i = I_m \sin \omega t \dots\dots\dots (444)$$

где ω — циклическая частота и I_m — максимальное мгновенное значение силы тока или амплитуда:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \pi f \dots\dots\dots (445)$$

T — длительность одного периода и f — число периодов в секунду или частота.

Любой периодический переменный ток (фиг. 144) может быть разложен по методу Фурье (Fourier) на ряд синусоидальных переменных токов,



Фиг. 144. Переменный ток.

частота которых кратна основной частоте. Таким образом, переменный ток, представленный на фиг. 144, мы будем называть несинусоидальным переменным током в противоположность синусоидальному, составляющему лишь одну волну с основной частотой. ур. (444). В электромашиностроении избегают образования в кривых тока этих гармонических составляющих, так как они вызывают в машинах потери и вредно отражаются на работе сети (явления резонанса) и соседних телефонных линий.

В Европе принята частота $f = 50$ периодов в секунду (в Америке применяется $f = 60$ пер/сек; для электрических ж. д. обычно принята более низкая частота $f = 16\frac{2}{3}$ пер/сек). Благодаря инерции стрелки невозможно измерять мгновенные значения переменного тока обыкновенными инструментами для постоянного тока. Переменные токи измеряются поэтому при помощи тепловых приборов, или же приборов, принцип действия которых покоится на электродинамическом действии двух катушек, несущих один и тот же ток. В обоих случаях (джоулево тепло в тепловом приборе или произведение токов в электродинамическом) измеряется среднее значение из квадратов мгновенных значений. Квадратный корень из среднего значения квадрата тока называется эффективным значением. Эффективное значение синусоидального тока выразится [ур. (444)]:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots (446)$$

¹⁾ Arnold, Die Wechselstromtechnik. Bd. IV. 2 Aufl. Springer, Berlin, 1913. — Petersen, W. Allgemeine Elektrotechnik. Bd. III (Wechselstrommaschinen) Enke, Stuttgart, 1910. — Schenkel, M. Elektrotechnik. Weber, Leipzig, 1923. — Pichelmayer, K. Dynamobau. Hirzel Leipzig, 1908.

²⁾ A. Fraenkel. Theorie der Wechselströme. 2 Aufl. Springer, Berlin, 1921.

Следовательно, для синусоидальной кривой

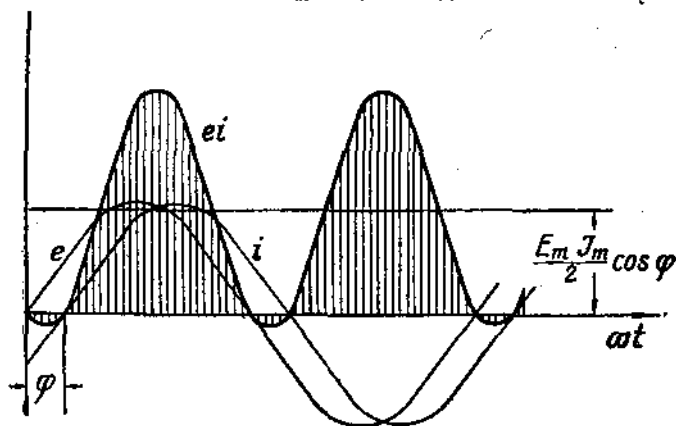
$$\text{эффективное значение} = \frac{\text{амплитуда}}{\sqrt{2}}.$$

В технике принято измерять переменный ток и переменное напряжение в эффективных значениях.

В цепях переменного тока может возникнуть сдвиг фаз между напряжением и током, т. е. напряжение может достигнуть своей амплитуды не в тот же момент, что и ток; например, на фиг. 145 ток достигает своего максимума позже, чем напряжение; в этих случаях говорят, что ток отстает по фазе относительно напряжения. Сдвиг фаз характеризуется углом сдвига фаз $\varphi = \omega t_1$. Таким образом уравнения для напряжения и тока на фиг. 145 будут гласить:

$$e = E_m \sin \omega t \quad (447)$$

$$i = I_m \sin (\omega t - \varphi) \quad (448)$$



Фиг. 145. Напряжение, ток, мощность.

Произведение из мгновенных значений напряжения e и тока i дают мгновенное значение мощности. Последняя изменяется во времени с двойной частотой основных волн. Интеграл мощности по времени (заштрихованная площадь на фиг. 145) дает величину работы. Взяв этот интеграл за время одного периода и разделив полученную величину на длительность одного периода T , мы получим среднюю мощность N переменного тока

$$N = \frac{1}{T} \int_0^T e \cdot i \, dt = \frac{1}{2} \cdot E_m \cdot I_m \cdot \cos \varphi = E \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (449)$$

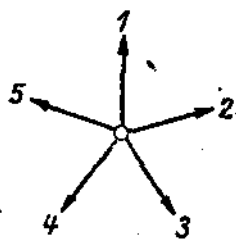
Таким образом, среднюю мощность можно выразить в виде произведения эффективных значений напряжения, тока и $\cos$ угла сдвига фаз между ними. Величину $\cos \varphi$ называют коэффициентом мощности. При совпадении напряжения и тока по фазе получается $\varphi = 0$ или $\cos \varphi = 1$; при заданных эффективных значениях напряжения и тока мощность в этом случае будет иметь наибольшую величину. При сдвиге фаз $\varphi = 90^\circ$ мы имеем $\cos \varphi = 0$ и средняя мощность, следовательно, также равна нулю. (Определение мощности по эффективным значениям предполагает собою заранее синусоидальные кривые тока и напряжения).

Синусоидальную кривую можно получить как проекцию вращающегося вектора (векторная диаграмма), равного по своей величине амплитуде, на некоторую неподвижную прямую (линия времени). Длительности одного периода T соответствует угол [ур. (445)]:

$$\omega T = 2\pi, \dots \dots \dots (450)$$

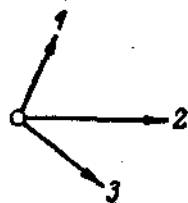
следовательно, полный оборот вектора. Сдвиги фаз во времени между двумя векторами выражаются здесь соответствующими углами фаз (фиг. 146). В векторных диаграммах, дающих лишь зависимость между отдельными величинами, вводят вместо амплитуд соответствующие эффективные значения. За направление вращения векторов при неподвижной линии времени принимается математическое направление вращения (против движения часовой стрелки); так, например, на фиг. 146 вектор I представляет собою ток, отстающий от напряжения, так как при данном направлении вращения этот вектор достигнет линии времени позже, чем вектор напряжения. В отдельных катушках машины, равномерно распределенных в пространстве по окружности якоря, могут создаваться напряжения одинаковой частоты, но все же различные по фазе. Если включить в цепь отдельные катушки, то в них будут проходить токи одинаковой частоты, имеющие вообще говоря, различные сдвиги фаз; последние зависят от сдвигов фаз напряжений, а также и от нагрузок. Такая система связанных между собою цепей с напряжениями, и токами, одинаковыми по частоте, но различными по фазе, называется многофазной системой. Последняя будет симметричной тогда, когда все напряжения равны между

Фиг. 146. Векторная диаграмма.



Фиг. 147. Симметричная многофазная система.

собой и два напряжения, следующих друг за другом во времени, сдвинуты друг относительно друга по фазе на одинаковый угол (фиг. 147). Напряжения симметричной n -фазной системы равны, следовательно:



Фиг. 148. Несимметричная многофазная система.

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= E_m \sin \omega t \\ e_2 &= E_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{n} \right), \\ e_3 &= E_m \sin \left(\omega t - 2 \cdot \frac{2\pi}{n} \right) \\ &\dots \dots \dots \\ e_n &= E_m \sin \left[\omega t - (n-1) \frac{2\pi}{n} \right] \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (451)$$

Все остальные системы (например, на фиг. 148) являются несимметричными многофазными системами.

Мощность n -фазной системы переменного тока равна сумме мощностей отдельных цепей. Согласно ур. (451) мы будем иметь мгновенные значения напряжения и силы тока для x -й фазы:

$$e_x = \sqrt{2} E \sin \left[\omega t - (x-1) \frac{2\pi}{n} \right], \dots \dots \dots (452)$$

$$i_x = \sqrt{2} I \sin \left[\omega t - (x-1) \frac{2\pi}{n} - \varphi \right] \dots \dots \dots (453)$$

Мгновенное значение мощности этой фазы равно тогда

$$e_x \cdot i_x = E \cdot I \left\{ \cos \varphi - \cos \left[2\omega t - 2(x-1)\frac{2\pi}{n} - \varphi \right] \right\} \dots \dots (454)$$

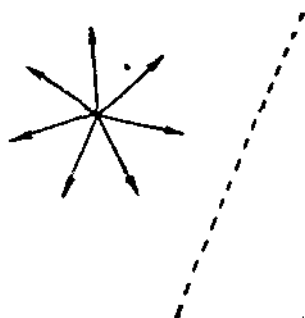
Сумма мощностей всех n фаз симметричной и симметрично нагруженной системы составляет

$$\sum_1^n e_x \cdot i_x = n E I \cos \varphi, \dots \dots \dots (455)$$

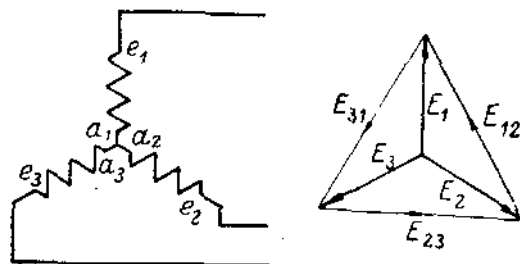
так как

$$\sum_1^n \cos \left[2\omega t - 2(x-1)\frac{2\pi}{n} - \varphi \right] = 0; \dots \dots \dots (456)$$

это объясняется тем, что сумма проекций одинаковых по величине и равномерно распределенных векторов на любую прямую (фиг. 149) равна нулю (сумма проекций векторов равна проекции их суммы, а последняя при симметричной системе, как известно, равна нулю). Из ур. (455) следует,



Фиг. 149. Проекция на прямую.



Фиг. 150. Соединение звездой.

что мощность в любой момент постоянна и равна n -кратной мощности одной цепи. Система, в которой выполнено ур. (455), называется уравновешенной системой. При неодинаковой нагрузке во всех фазах суммарная мощность системы пульсирует; такая система будет неуравновешенной.

Постоянной мощности уравновешенной системы соответствует постоянный момент вращения двигателя, питаемого такой системой.

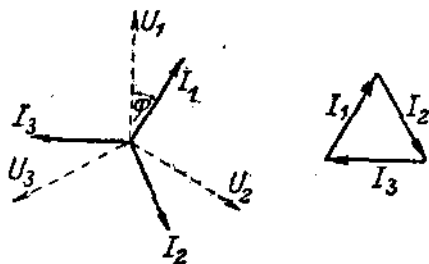
В зависимости от того, связывают или нет отдельные цепи многофазной системы одну с другой, отличают связанные и несвязанные системы. В последних для каждой цепи требуются два провода (прямой и обратный), следовательно, для n -фазовой системы — $2n$ проводов. Напротив, благодаря электрическому сцеплению фаз число проводов при симметричных системах можно довести до n , а при несимметричных системах — до $n+1$. Несвязанные системы не получили поэтому никакого распространения в технике.

Из различных типов сопряжений наиболее существенными являются соединение звездой и соединение кольцом или многоугольником.

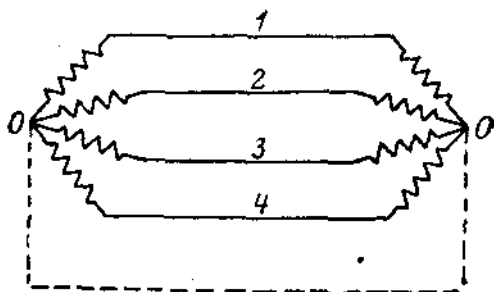
При соединении звездой связываются друг с другом все начала обмоток, тогда как концы приключаются к проводам сети (фиг. 150). Если симметричную систему, соединенную в звезду, нагрузить симметрично, то токи, проходящие в отдельных катушках системы, будут также равны

между собою и сдвинуты друг относительно друга по фазе на одинаковый угол (фиг. 151). Геометрическая сумма этих токов равна нулю; сумма всех токов, притекающих к месту соединения катушек, в любой момент равна сумме всех утекающих токов.

При несимметричных нагрузках симметричных систем и, вообще говоря, при несимметричных системах геометрическая сумма всех токов не равна нулю. В этом случае необходимо предусмотреть нулевой провод, соединяющий узловые точки систем источника тока и потребителя, для того, чтобы результирующий ток имел возможность пройти, не выравниваясь через катушки (фиг. 152).



Фиг. 151. Токи при симметричной нагрузке.



Фиг. 152. Несимметричная многофазная система.

Напряжения в ур. (451) называются фазовыми напряжениями; их можно измерить между наружным и нулевым проводами; в звезде напряжений (фиг. 150) вектора $E_1, E_2, \dots$ представляют собою эффективные значения фазовых напряжений. Напряжение между двумя внешними проводами или, что то же самое, между двумя концами соседних катушек, является геометрической разностью соответствующих фазовых напряжений (фиг. 150):

$$\left. \begin{aligned} E_{12} &= E_1 - E_2, \\ E_{23} &= E_2 - E_3, \\ &\dots \dots \dots \\ E_{(n-1)n} &= E_{(n-1)} - E_n, \\ E_{n1} &= E_n - E_1 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (457)$$

Эти напряжения носят название линейных или междуфазовых, а иногда также связанных напряжений. При симметричной n -фазной системе междуфазовое напряжение E определяется из фазового напряжения E на основании следующей геометрической зависимости в звезде напряжений:

$$E_s = 2E \sin \frac{\pi}{n} \dots \dots \dots (458)$$

При соединении кольцом конец одной катушки связывается с началом следующей (фиг. 153). Провода сети подводятся к местам соединения двух катушек. Таким образом, в этой схеме напряжение сети равно фазовому напряжению. В противоположность этому фазовый ток здесь отличается от тока в сети. Зададимся некоторым направлением отсчета. Пусть

в наружном проводе ток идет от источника, а в кольцевом соединении — по часовой стрелке. По правилу узла мы получим тогда

$$i_1 - i_2 - i_{12} = 0, \dots \dots \dots (459)$$

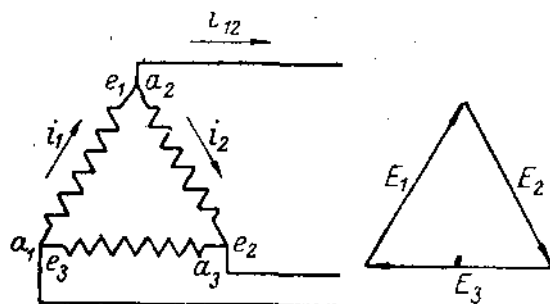
или

$$i_{12} = i_1 - i_2 \dots \dots \dots (460)$$

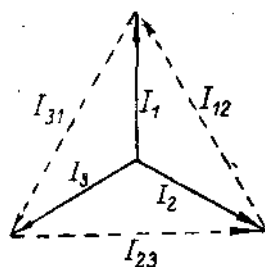
В симметричной и равномерно нагруженной системе звезда векторов тока в соединении многоугольником аналогична звезде векторов напряжения в соединении звездой (фиг. 150). Здесь можно, следовательно, ток в сети определить также из геометрической разности обоих фазовых токов узловой точки, для чего используем то же геометрическое соотношение:

$$I_n = 2I \sin \frac{\pi}{n} \dots \dots \dots (461)$$

Наиболее распространенной из всех фазовых систем является трехфазная система. При соответствующем выполнении она обладает преимуществом балансирующей системы, а именно — передачей мощности,



Фиг. 153. Соединение многоугольником.



Фиг. 154. Звезда для токов при соединении многоугольником.

постоянной во времени. Трехфазный ток особенно пригоден поэтому для питания силовых установок. Большое число фаз стараются избегать, так как при этом увеличивается потребное число проводов сети.

При соединении звездой линейное напряжение трехфазной системы (фиг. 150) составляет ур. (458):

$$E_s = 2E \sin \frac{\pi}{3} = \sqrt{3} E \dots \dots \dots (462)$$

Ток в сети равен фазовому току:

$$I_n = I \dots \dots \dots (463)$$

При симметричной нагрузке мощность системы ур. (455) составит

$$N = 3EI \cos \varphi = \sqrt{3} E_s \cdot I_n \cdot \cos \varphi \dots \dots \dots (464)$$

При кольцевом соединении, что при трехфазной системе носит название соединения треугольником, напряжение сети равно фазовому напряжению:

$$E_n = E, \dots \dots \dots (465)$$

тогда как ток в сети ур. (461):

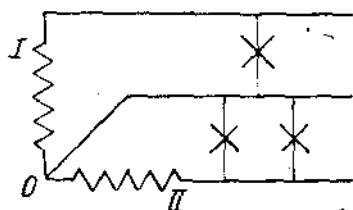
$$I_n = 2I \sin \frac{\pi}{3} = \sqrt{3} I \dots \dots \dots (466)$$

Отсюда получается для мощности:

$$N = 3EI \cos \varphi = \sqrt{3} E_n \cdot I_n \cos \varphi \quad (467)$$

Если при трехфазной системе, сбединенной в звезду, вывести вместе с внешними проводами и нулевой провод, то кроме линейного напряжения (между двумя внешними проводами) можно для однофазной нагрузки использовать также и меньшее фазовое напряжение (между внешним проводом и нулевым).

Двуфазные системы применяются лишь с несимметричной схемой (фиг. 155), при чем ЭДС обеих фазовых обмоток сдвинуты по фазе одна относительно другой на 90° . При симметричной схеме (сдвиг фаз в 180°) ЭДС отдельных фазовых обмоток или были бы противоположны одна другой (результатирующая ЭДС = 0), или же совпадали бы по фазе (однофазная система). Из-за несимметричности схемы двуфазная система снабжается нулевым проводом. При равномерной нагрузке сумма мгновенных мощностей обеих фаз постоянна; система, следовательно, будет уравновешенной.



Фиг. 155. Двуфазная система.

Мощность двуфазной системы равна, по ур. (455).

$$N = 2EI \cos \varphi \quad (468)$$

Междуфазовое напряжение ур. (458), равно

$$E_s = 2E \sin \frac{\pi}{4} = \sqrt{2} E \quad (469)$$

Здесь для числа фаз следует принять $n = 4$, так как несимметричную двуфазную систему можно мыслить как часть симметричной четырехфазной системы.

Двуфазная система требует 3 проводов, а потому не имеет никаких преимуществ перед трехфазной системой. Последняя все же дает возможность лучшего электрического использования машины; двуфазные системы встречаются поэтому все реже.

Однофазные системы применяются лишь в особых случаях. В железнодорожном деле, например, они обладают особыми преимуществами. Здесь оказывается достаточным лишь один питающий провод, так как рельсы служат в качестве обратного провода. Однофазная система требует, однако, двигателей особой конструкции (коллекторные двигатели). Кроме того, однофазные машины в электрическом отношении не могут быть в такой мере использованы, как машины трехфазного тока, а потому при той же мощности оказываются тяжелее и дороже.

Мощность однофазной системы подсчитывается по ур. (449).

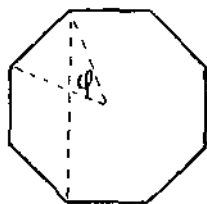
§ 2. Индуктированная электродвижущая сила.

Было уже доказано (часть 1, А, § 2), что в обмотках машины постоянного тока создается переменный ток, который выпрямляется в дальнейшем в постоянный ток при помощи коллектора. Удалив коллектор и подведя две любые точки замкнутой обмотки к контактным кольцам, мы можем снять переменный ток, частота которого зависит от числа оборотов в минуту n и числа пар полюсов p ур. (29):

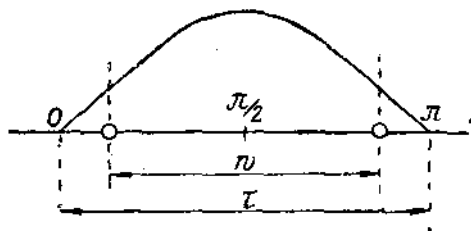
$$f = \frac{p \cdot n}{60} \quad (470)$$

При синусоидальном изменении во времени потока, пронизывающего отдельные катушки, можно ЭДС отдельных катушек замкнутой обмотки представить в виде многоугольника напряжения (фиг. 22). Если сделать ответвления в двух местах обмотки и подвести эти точки к контактным кольцам, то максимальное значение переменной ЭДС на кольцах можно будет получить из многоугольника напряжений (фиг. 156), проведя для этого хорду, соединяющую углы многоугольника, соответствующие точкам ответвлений.

Максимально возможная ЭДС при заданном числе витков получается в том случае, если все витки в одно и то же время пронизываются максимально возможным потоком, т.е. когда все витки имеют общую ось (концентрическая обмотка) и ширина витка (расстояние между проводами одного витка) равна полюсному делению. При обмотке, распределенной в пространстве, максимальные значения отдельных ЭДС в витках достигаются в различное время; в многоугольнике напряжений (фиг. 156) соответствующие вектора сдвинуты друг относительно друга по



Фиг. 156. Многоугольник напряжений.



Фиг. 157. Влияние ширины катушки на величину индуктированной ЭДС.

фазе. Максимальное значение результирующей ЭДС (геометрическая сумма отдельных векторов, хорда в многоугольнике напряжений) будет поэтому меньше, чем алгебраическая сумма максимальных значений ЭДС отдельных витков. При ширине витка меньшей, чем полюсное деление, последний ни в одном положении не будет пронизываться максимальным потоком; благодаря этому результирующая ЭДС будет еще меньше в сравнении с максимально возможной.

Для более легкого подсчета индуктированной ЭДС обмотки целесообразнее всего исходить из максимально возможного значения и уменьшить его затем при помощи обмоточного коэффициента k_w . Последний представляет собою отношение действительной ЭДС к максимально возможной; оно обусловлено типом и устройством обмотки.

Для определения обмоточного коэффициента необходимо остановиться на частных коэффициентах, характеризующих отдельные влияния типов и устройства обмотки на величину ЭДС.

Обмоточный коэффициент витка k_w учитывает влияние ширины витка или катушки w на величину ЭДС. Предполагая, что поток распределен синусоидально по окружности якоря (фиг. 157), мы получим:

$$k_w = \sin\left(\frac{w}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right), \quad \dots \dots \dots (471)$$

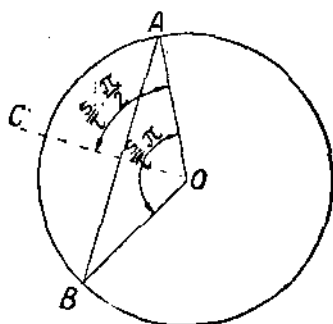
где τ — полюсное деление.

Обмоточный коэффициент фазы k_f учитывает влияние распределения обмотки на окружности якоря. При достаточно равномерном распределении (при наличии многих пазов) многоугольник напряжений переходит

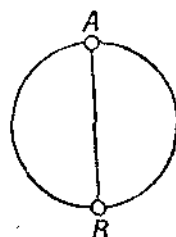
в окружность. Полный угол 2π соответствует двум полюсным делениям. Коэффициент ξ будет тогда равен отношению результирующей ЭДС рас- пределенной обмотки (хорда $\overline{AB}$ на фиг. 158) к ЭДС concentрической обмотки с тем же числом витков (дуга $\widehat{ACB}$ на фиг. 158). Мерой для ξ является отношение дуги s , по которой распределена обмотка, к полюсному делению τ . Из фиг. 158 следует:

$$\xi_s = \frac{\sin\left(\frac{s}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{\frac{s}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}} \dots \dots \dots (472)$$

При незначительном числе пазов на пару полюсов угол φ в много- угольнике напряжений, соответствующий пазовому делению t (фиг. 156),



Фиг. 158. Влияние распре- деления обмотки в простран- стве на величину индукти- рованной ЭДС.



Фиг. 159. Диа- грамма напря- жений для об- мотки с одно- фазными ответ- влениями.

будет настолько велик, что обусловленное этим увеличение дуги (знамена- тель в ур. 472) должно быть учтено при помощи коэффициента ξ_t (многоугольник напряжений / окружность напряжений):

$$\xi_t = \frac{\sin\left(\frac{t}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{\frac{t}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}} \dots \dots \dots (473)$$

следовательно,

$$\xi = \xi_s \cdot \xi_t \cdot \frac{1}{\xi_t} = \sin\left(\frac{w}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin\left(\frac{s}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{t}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right)} \cdot \frac{t}{s} \dots \dots \dots (474)$$

В дальнейшем ширина катушки будет приниматься равной полюсному делению, а число пазов будет взято достаточно большим, так что для коэффициента обмотки будет действительно ур. (472).

В замкнутой обмотке максимальную ЭДС получают устройством ответвлений на двух диаметрально противоположных точках AB окружно- сти напряжений (фиг. 159). Это напряжение при наличии коллектора подается обмоткой в качестве напряжения постоянного тока ур. (32):

$$E_{ct} = \xi \cdot E_w \cdot \frac{w}{2} = \frac{2}{\pi} \cdot E_w \cdot \frac{w}{2} = 0,637 \cdot E_w \cdot \frac{w}{2} \dots \dots \dots (475)$$

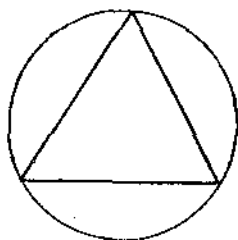
Здесь E_w — максимальное значение ЭДС одного витка, а w — число витков замкнутой обмотки. Подводя ответвления от обмотки к контактным кольцам, мы получим переменное напряжение, максимальное значение которого имеет величину постоянного напряжения.

$$E_m = E_{GI} \dots \dots \dots (476)$$

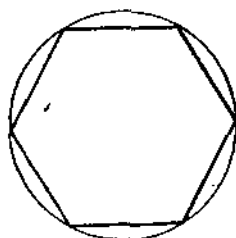
Эффективное значение этого напряжения равно {ур. (446)}:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \xi \cdot E_w \cdot \frac{w}{2} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot E_w \cdot \frac{w}{2} \dots \dots \dots (477)$$

При соответствующем числе ответвлений, подводимых к контактным кольцам, можно применить якорь машины постоянного тока для питания любой многофазной системы. Система будет симметричной при равномерном распределении ответвлений. Секции якоря при этом соединены многоугольником (см. выше).



Фиг. 160. Диаграмма напряжений для обмотки с трехфазными ответвлениями.



Фиг. 161. Диаграмма напряжений для обмотки с шестифазными ответвлениями.

На фиг. 160 представлена диаграмма напряжений якоря постоянного тока с трехфазными симметричными ответвлениями. Согласно ур. (472), обмоточный коэффициент равен

$$\xi = \frac{\sin\left(\frac{2}{3} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{\frac{2}{3} \cdot \frac{\pi}{2}} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} = 0,826 \dots \dots \dots (478)$$

Таким образом, эффективная ЭДС сопряженной трехфазной системы равна

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \xi \cdot E_w \cdot \frac{1}{3} w, \dots \dots \dots (479)$$

где, аналогично предыдущему, w — число витков замкнутой обмотки.

В обмотке с шестифазными ответвлениями (фиг. 161) мы имеем:

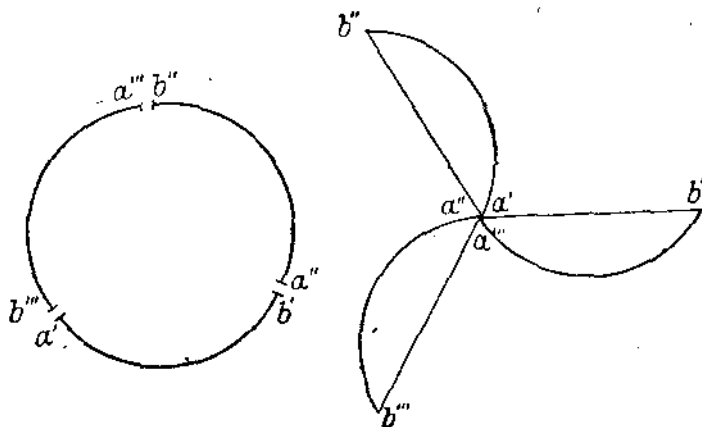
$$\xi = \frac{\sin\left(\frac{1}{3} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{\frac{1}{3} \cdot \frac{\pi}{2}} = \frac{3}{\pi} = 0,955 \dots \dots \dots (480)$$

и

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \xi \cdot E_w \cdot \frac{1}{6} w \dots \dots \dots (481)$$

Замкнутая обмотка с ответвлениями на практике применяется в одноякорных преобразователях. У последних имеется якорь постоянного тока; на одной стороне его предусмотрен коллектор, тогда как с другой стороны от обмотки подводятся три или шесть ответвлений к контактным кольцам. Напряжения со стороны постоянного тока и переменного тока находятся между собой в определенном отношении, которое можно вывести из вышеприведенных формул¹⁾.

Обмоточный коэффициент ξ является мерой использования обмотки. При небольшом обмоточном коэффициенте для достижения той же ЭДС необходимо большее число витков, чем при большом ξ . Примеры показывают, что обмоточный коэффициент, а значит и использование обмотки, возрастает с увеличением числа ответвлений. При шестифазном ответвлении ($\xi = 0,955$) практически достигается полное использование обмотки.



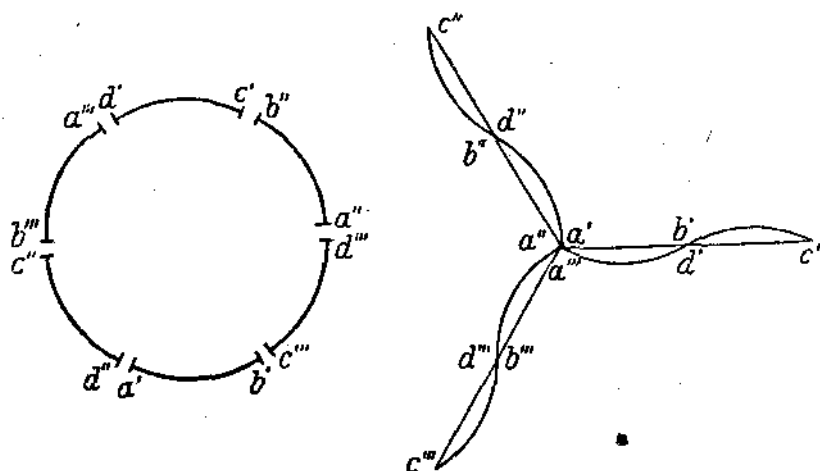
Фиг. 162. Диаграмма напряжений для обмотки, разрезанной в трех местах и соединенной в трехфазную звезду.

В обыкновенной обмотке постоянного тока возможно соединение многофазной системы переменного тока также и звездой. Однако, при этом замкнутую обмотку следует разрезать в нескольких местах (соответственно желательному числу фаз). Соединив все начала полученных частей обмотки в одну точку и подведя концы к контактным кольцам, мы получим желательный многофазный переменный ток. На фиг. 162 изображено осуществленное таким путем соединение звездой для трехфазной системы. Обмоточный коэффициент здесь такой же, как и в ур. (478); таким образом, использование обмотки здесь относительно плохое. Лучшее использование достигается при делении обмотки постоянного тока в шесть мест и соответствующем соединении частей, одинаковых по фазе (фиг. 163). Обмоточный коэффициент такой обмотки, согласно ур. (480), равен $\xi = 0,955$.

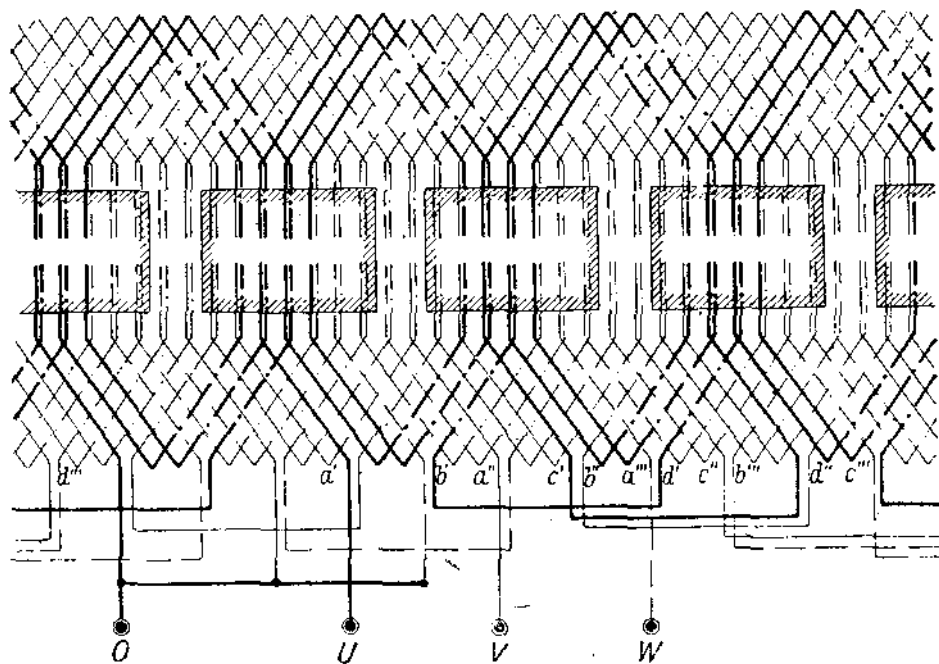
Развернутая схема такой обмотки для $p = 4$ полюсам и $q = 3$ пазам на один полюс представлена на фиг. 164. В машинах постоянного тока необходимости сохранить неизменной картину расположения обмотки якоря относительно щеток повела к устройству двуслойной обмотки. При машинах переменного тока такой необходимости нет. Здесь можно поэтому уложить все провода одного пазы в один слой, что ведет к однослойной обмотке.

¹⁾ См. там же: Преобразователи.

Результирующая ЭДС фазовой обмотки не зависит от того, в каком порядке складывают частичные ЭДС отдельных индуцированных проводов. Таким образом, результирующая ЭДС в проводах, относящихся к двум



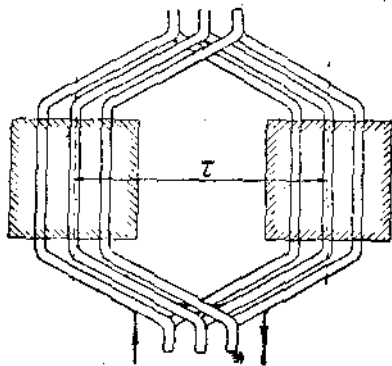
Фиг. 163. Диаграмма напряжений для обмотки, разрезанной в шести местах и соединенной в трехфазную звезду.



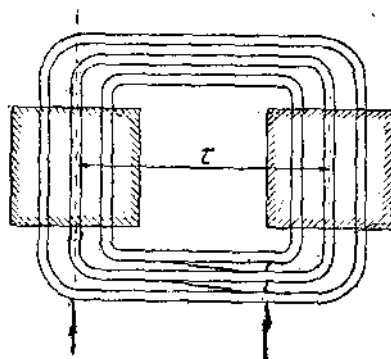
Фиг. 164. Схема двуслойной обмотки, разрезанной в шести местах и соединенной в трехфазную звезду.

группам, одинаково расположенным под соседними полюсами (и соответствующих расположенным одна против другой сторонам многоугольника напряжений на фиг. 161), не зависит от расположения лобовых соединений, соединяющих рассматриваемые проводники. Поэтому, выполнение лобовых

соединений, необходимое в обмотках постоянного тока для получения витков одинаковой ширины, — в обмотках переменного тока не применяется; провода соединяются между собою так, как изображено на фиг. 166. Благодаря этому витки оказываются различной ширины и в них индуктируются ЭДС различной величины; при этом выполнении оси витков, в противоположность выполнению, представленному на фиг. 165, совпадают



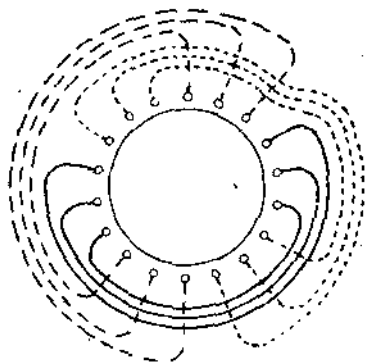
Фиг. 165. Витки одинаковой ширины.



Фиг. 166. Витки, имеющие общую ось.

между собою, так что мгновенные значения во всех витках совпадают по фазе. В отношении результирующей ЭДС оба устройства не отличаются друг от друга. В отношении же выполнения соединение по фиг. 166 имеет

то преимущество, что при этом удается избежать многочисленных пересечений проводов в лобовых соединениях, благодаря чему, в особенности при обмотках высокого напряжения, легко могут быть сохранены необходимые воздушные промежутки. Кроме того, изготовление таких обмоток проще и расхода меди в них меньше, так как лобовые соединения получаются более короткими. Этим и объясняется более частое применение обмотки из фиг. 166 в технике переменных токов.



Фиг. 167. Шестизонная трехфазная обмотка (двуполюсная).

Группу витков, показанных на фиг. 165 или 166, называют катушкой; обе группы проводов под соседними полюсами носят название катушечных сторон, а лобовые соединения называются головками катушек.

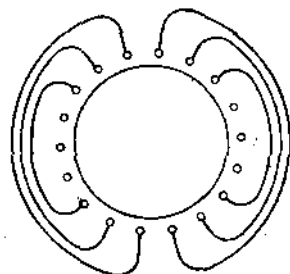
Для подсчета ЭДС одной катушки целесообразнее всего пользоваться расположением фиг. 165, так как здесь ЭДС витков одинаковы. Сдвиг фаз между ЭДС витков, обусловленный различным положением осей витков, учитывается соответствующим обмоточным коэффициентом k (см. выше). Мерой для величины k является отношение ширины стороны катушки (зоны) к полюсному делению. При трехфазных обмотках ширина двух полюсных делений (соответствующая 360 электрическим градусам) делится обычно на 6 зон (фиг. 167); провода каждой двух зон, удаленных одна от другой на одно полюсное деление, соединяются в одну катушку при помощи лобовых соединений. Таким образом, возникают три катушки, оси которых сдвинуты друг относительно друга на 120 электрических градусов; эти катушки принадлежат трем фазам. Все три фазовых обмотки

могут быть соединены в звезду или в треугольник. При наличии в машине p пар полюсов на окружности якоря расположены $3p$ катушек, следовательно, p катушек в каждой фазе. В зависимости от желательного напряжения, катушки могут быть соединены последовательно или параллельно; при параллельном соединении необходимо следить за тем, чтобы в параллельных ветвях были одинаковые сопротивления и индуктированные ЭДС, ибо в противном случае в обмотке возникнут уравнивающие токи.

Соответственно шестизонной обмотке, обмоточный коэффициент, при наличии многих пазов в одной катушечной стороне, будет равен $\xi = 0,955$ ур. (480). При небольшом количестве пазов в одной катушечной стороне обмоточный коэффициент будет больше ур. (473) и (474); если все провода одной катушечной стороны расположены в одном пазу, то $\xi = 1$.

Ниже даны обмоточные коэффициенты для различного числа пазов q в одной катушечной стороне трехфазной шестизонной обмотки ¹⁾.

$q=1$	$\xi=1,000$
2	0,966
3	0,960
4	0,958
6	0,956
10	0,955



Фиг. 168. Однофазная обмотка.

В однофазных обмотках последние укладываются лишь в $\frac{2}{3}$ пазов, соответствующих одному полюсному делению, так как при заполнении всех пазов использование было бы плохим (ур. 475). На одну пару полюсов и здесь приходится одна катушка, которая, однако, для простоты выполнения, делится на две частичные катушки (фиг. 168). При q заполненных пазах одной катушечной стороны и при отношении ширины катушечной стороны к полюсному делению, равном 2:3, обмоточный коэффициент будет равен (см. также ур. 478):

$q=2$	$\xi=0,866$
4	0,836
6	0,831
8	0,829
10	0,828
20	0,827

Если при движении катушки мимо полюса магнитный поток φ (максвелл), ее пронизывающий, изменяется во времени синусоидально по уравнению

$$\varphi = \Phi_m \sin \omega t, \quad \dots \dots \dots (482)$$

то ЭДС, индуктированная в витке, ширина которого равна полюсному делению, выразится:

$$e = \frac{d\varphi}{dt} \cdot 10^{-8} = -\omega \cdot \Phi_m \cdot \cos \omega t \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \quad \dots \dots \dots (483)$$

¹⁾ R. Richter. Ankerwicklung für Gleich- und Wechselstrommaschinen, 359. Springer. Berlin, 1920.

Максимальная ЭДС витка, следовательно, равна:

$$E_m = \omega \cdot \Phi_m \cdot 10^{-8} = 2\pi f \cdot \Phi_m \cdot 10^{-8} \text{ вольт,} \quad (484)$$

а эффективная ЭДС витка:

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot \Phi_m \cdot 10^{-8} = 4,44 \cdot f \cdot \Phi_m \cdot 10^{-8} \text{ вольт,} \quad (485)$$

следовательно, для w витков одной катушки, учитывая при помощи соответствующего обмоточного коэффициента k распределение катушечных сторон в пространстве, получится:

$$E = 4,44 \cdot w \cdot k \cdot f \cdot \Phi_m \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \quad (486)$$

В большинстве практических случаев поток, пронизывающий катушку, не изменяется синусоидально во времени, так как распределение в пространстве индукции, созданной обмотками полюсов, не синусоидально по окружности якоря. ЭДС, индуктированная в витке (ширина которого

равна полюсному делению), имеет такую же форму кривой в функции времени, как и кривая нормальной слагающей индукции в воздушном зазоре, взятой в функции окружности якоря; дело в том, что поток, пронизывающий виток, в каждый момент представляет собою интеграл индукции по соответствующей части окружности якоря, а ЭДС является производной от потока по времени, при чем изменения во времени и в пространстве связаны постоянной зависимостью

$$\angle \alpha = \omega t \quad (487)$$

Следовательно, для получения возможно более синусоидальной кривой напряжения (В, § 1) необходимо позаботиться о том, чтобы индукция, созданная полюсами, распределялась возможно более синусоидально по окружности якоря. С большим приближением можно достигнуть этого путем придания соответствующей формы полюсному башмаку (неодинаковый по окружности якоря воздушный зазор под полюсными башмаками) или путем распределения обмотки возбуждения.

Выполнение полюсов, принятое в технике, представлено на фиг. 169, при чем a и b относятся к машинам с выступающими полюсами, а c — к машинам с невыступающими полюсами (турбогенераторы). Согласно фиг. 169а полюсному башмаку придают такую форму, чтобы ширина воздушного зазора, измеренная в радиальном направлении в каком-либо месте, на расстоянии x от середины башмака была равна

$$\delta_x = \frac{\delta_0}{\cos\left(\frac{x}{\tau} \pi\right)}, \quad (488)$$

Фиг. 169. Различные выполнения полюсов и соответствующие кривые поля.

где $\delta_0 = k_p \cdot \delta_0'$ — величина действительного воздушного зазора δ_0' в самом узком месте (середина башмака), умноженного на коэффициент Картера (А, § 5). При постоянной магнитодвижущей силе над полюсным делением

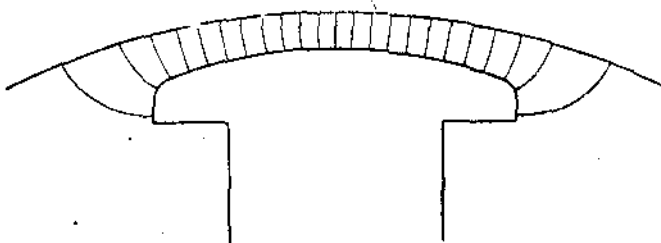
(при обмотке полюсов, сконцентрированной в катушку) напряжение поля, а тем самым и индукция, распределяется синусоидально по всему полюсному делению; при этом предполагается, что суммарное магнитное сопротивление сосредоточено в обоих воздушных зазорах магнитной цепи, а индукционные линии проходят через воздушный зазор нормально к окружности якоря (в радиальном направлении):

$$\text{МДС} = 2H_x \delta_x = 2H_0 \delta_0, \dots \dots \dots (489)$$

$$H_x = B_x = \frac{\text{МДС}}{2\delta_x} = \frac{\text{МДС}}{2\delta_0} \cos\left(\frac{x}{\tau} \pi\right) = B_0 \cos\left(\frac{x}{\tau} \pi\right) \dots \dots \dots (490)$$

Здесь H_0 и B_0 — напряжение поля и индукция под серединой полюсного башмака.

В действительности, однако, индукционные линии проходят в воздушном зазоре не в радиальном направлении, так как они (предполагая бесконечную проводимость железа) покидают полюсные башмаки по направлению, перпендикулярному к последним, и под таким же прямым углом проникают в поверхность якоря; благодаря этому искривляются пути, проходимые этими линиями (фиг. 170). Воздушный зазор, построенный по ур. (488), не дает, следовательно, точного синусоидального распределения индукции по окружности якоря.



Фиг. 170 Индукционные линии в воздушном зазоре.

Учитывая действительный путь индукционных линий в воздушном зазоре, Рюденберг¹⁾ для бесконечно большого диаметра якоря (поверхность якоря представляет собою плоскость, что для практики при больших диаметрах и четырехполюсных машинах приводит к очень точным результатам) дает уравнение для построения кривой очертания полюсного башмака:

$$\delta_x = \frac{\tau}{\pi} \arcsin h \left(\frac{\sin h \pi \frac{\delta_0}{\tau}}{\cos \pi \frac{x}{\tau}} \right) \dots \dots \dots (488a)$$

Рихтер²⁾ приводит точное уравнение для радиуса-вектора R_x кривой очертания полюсного башмака, учитывая кривизну поверхности якоря (R_1 — радиусу якоря):

$$R_x = \sqrt{\frac{F_0}{\cos \frac{x}{\tau} \pi} + \sqrt{R_1^{2p} + \frac{F_0^2}{\cos^2 \frac{x}{\tau} \pi}}} \dots \dots \dots (488b)$$

$$F_0 = \frac{(R_1 - \delta_0)^{2p} - R_1^{2p}}{2(R_1 - \delta_0)^p},$$

где p — число пар полюсов.

В пределах дуги полюсного башмака $\alpha \cdot \tau$ воздушный зазор, рассчитанный из ур. (488), так мало отличается от теоретического, что вполне допустимо строить по этому уравнению кривую башмака.

¹⁾ R. Rüdenberg. Über Induktionsverteilung und Verlustberechnung. Elektrotechnische Ztschr. 1906, S 109.

²⁾ R. Richter. Elektrische Maschinen. 1. 172. Springer, Berlin, 1924.

Более простым в конструктивном отношении является постоянный воздушный зазор по фиг. 169b, так как здесь поверхности башмаков могут быть обточены. Кривая распределения индукции по окружности якоря имеет здесь приблизительно прямоугольную форму; кривая имеет наряду с основной волной также и различные гармонические составляющие (например, сильную третью гармонику). Скашиванием или закруглением краев полюсного башмака можно уменьшить крутизну кривой поля, благодаря чему ослабляются гармонические составляющие.

В машинах с неявными полюсами обмотка возбуждения распределена, при чем обмоткой снабжена лишь часть полюсного деления (фиг. 169c). На участке, где имеется обмотка, МДС возрастает с увеличением числа сцепленных витков возбуждения. Там, где обмотка отсутствует, МДС все время сохраняет свое максимальное значение, так как здесь каждая индукционная линия сопряжена со всеми витками возбуждения; в дальнейшем МДС снова прямолинейно падает, так как сопряжение уменьшается. Таким образом, пренебрегая разницей в насыщении железа, мы будем иметь при постоянном воздушном зазоре трапециoidalную форму индукции на окружности якоря, очень близкую к синусоиде (при обмотке, охватывающей $\frac{2}{3}$ τ).

При отклонении кривой распределения индукции по окружности якоря от синусоидальной формы, эту кривую разлагают на синусоидальные волны по методам гармонического анализа¹⁾.

Поток, соответствующий основной волне кривой индукции, индуктирует основную волну ЭДС; гармонические составляющие потока создают соответствующие гармоники ЭДС.

Мгновенное значение несинусоидальной ЭДС выразится:

$$e = \sum E_{cm} \sin(c\omega t + \psi_c), \dots \dots \dots (491)$$

где c — порядковое число гармоники.

Эффективное значение равно [ур. (446)]:

$$E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum E_{cm} \sin(c\omega t + \psi_c) \right]^2 dt} \dots \dots (492)$$

Интеграл по полному периоду T из произведения двух синусоидальных функций различной частоты равен нулю. Под интегралом остается только сумма квадратичных членов:

$$\left. \begin{aligned} E &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \sum E_{cm}^2 \sin^2(c\omega t + \psi_c) dt} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \sum E_{cm}^2 [1 - \cos 2(c\omega t + \psi_c)] dt} = \\ &= \sqrt{\sum \frac{1}{2} E_{cm}^2} = \sqrt{\sum E_c^2}. \end{aligned} \right\} \dots \dots (492a)$$

¹⁾ С. Runge. Methode der Zerlegung in Sinuswellen. Elektrot. Ztschr. 1905, S., 247. См. также К. А. Круг. Основы электротехники.

Благодаря одинаковому выполнению полюсов распределение потока в пространстве под каждым полюсом будет одинаковое; таким образом, отрицательная половина волны ЭДС будет также зеркальным отражением положительной половины относительно оси времени. Подобные периодические кривые содержат лишь нечетные гармоники. Следовательно:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \dots} \quad (492b)$$

Влияние гармоник на эффективное значение несинусоидальной ЭДС незначительно. Если, например, амплитуда 3-ей гармоники составляет 20% от амплитуды основной волны, то, пренебрегая остальными гармониками, мы получим эффективное значение результирующей ЭДС:

$$E = \sqrt{E_1^2 + 0,04 E_1^2} = 1,02 E_1 \quad (493)$$

Практически достаточно поэтому определить поток, соответствующий основной волне кривой распределения поля, и положить его в основу подсчета ЭДС. Отношение этого потока основной волны Φ_1 к действительному потоку Φ называется коэффициентом поля.

$$k_f = \frac{\Phi_1}{\Phi} \quad (494)$$

Кривая поля может быть определена или графически при помощи графического изображения поля или же измерениями в готовых машинах.

В качестве примера определим коэффициент поля для теоретической прямоугольной кривой поля (постоянный воздушный зазор под полюсом) (фиг. 171). Отношение полюсной дуги к полюсному делению называется коэффициентом магнитного перекрытия:

$$\alpha = \frac{b}{\tau} \quad (495)$$

Действительный поток равен

$$\Phi = l_f \cdot \alpha \cdot \tau \cdot B_1 \quad (496)$$

где l_f — расчетная длина якоря машины, B_1 — амплитуда основной волны прямоугольной кривой поля; следовательно:

$$\Phi_1 = l_f \cdot \tau \cdot \frac{2}{\pi} \cdot B_1 \quad (497)$$

Таким образом, коэффициент поля равен

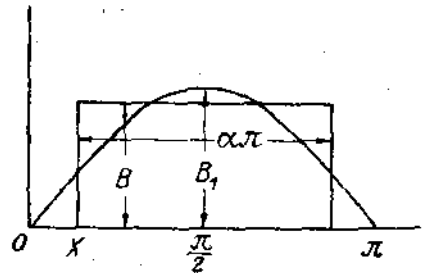
$$k_f = \frac{\Phi_1}{\Phi} = \frac{2}{\alpha \cdot \pi} \cdot \frac{B_1}{B} \quad (498)$$

Согласно методу Фурье, мы имеем:

$$B_1 = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} B \sin x dx = \frac{4}{\pi} B \cdot \cos X = \frac{4}{\pi} B \cos (1 - \alpha) \frac{\pi}{2} = \frac{4}{\pi} B \sin \frac{\alpha \cdot \pi}{2} \quad (499)$$

Коэффициент поля прямоугольной кривой, следовательно, равен

$$k_f = \frac{8}{\alpha \pi^2} \sin \left(\frac{\alpha \pi}{2} \right) \quad (500)$$



Фиг. 171. Прямоугольное поле и его основная волна.

Соответственно этому мы получим для теоретической синусоидальной кривой поля (так как $\alpha < 1$, то наружные части кривой на фиг. 172 не представлены)

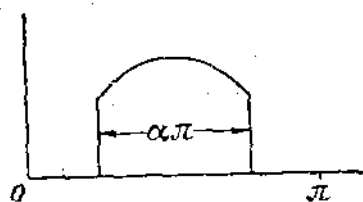
$$k_f = \frac{\alpha\pi + \sin \alpha\pi}{\pi \sin \frac{\alpha\pi}{2}}, \dots \dots \dots (501)$$

а для трапециoidalной кривой поля (фиг. 173)

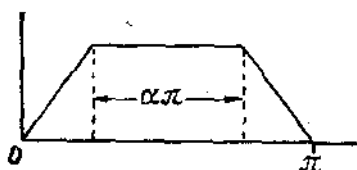
$$k_f = \frac{32}{\pi^3} \cdot \frac{\cos\left(\alpha \frac{\pi}{2}\right)}{1 - \alpha^2} \dots \dots \dots (502)$$

Учитывая распределение потока в пространстве под полюсным башмаком, мы получим, следовательно [ур. (486)]:

$$E = 4,44 \cdot \xi \cdot k_f \cdot w \cdot f \cdot \Phi_m \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \dots \dots \dots (503)$$



Фиг. 172. Синусоидальное поле в пределах полюсного башмака.



Фиг. 173. Трапециoidalное поле.

По Каппу (Карр) все три первые постоянные величины в ур. (503) объединяются в один коэффициент, именуемый коэффициентом Каппа

$$k = 4,44 \cdot \xi \cdot k_f, \dots \dots \dots (504)$$

следовательно:

$$E = k \cdot w \cdot f \cdot \Phi_m \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \dots \dots \dots (503a)$$

Если одна фаза обмотки состоит из нескольких последовательно соединенных катушек, ЭДС которых имеют одинаковые фазы, то ЭДС одной фазы, индуцированную при холостом ходе, получают, подставив в ур. (503a) для w суммарное число витков всех последовательно соединенных катушек. При помощи соотношений, приведенных в п. В, § 1, в зависимости от характера соединений фазовых обмоток между собою, можно определить из ЭДС, индуцированной в одной фазе, сопряженную ЭДС, индуцированную при холостом ходе на зажимах машины.*

Кривая результирующей ЭДС при холостом ходе машины имеет форму, более близкую к синусоидальной, чем кривая распределения поля. Это объясняется тем, что для обычного типа обмоток обмоточные коэффициенты при гармониках меньше, чем при основной волне. Одному полупериоду (π) основной волны соответствует полюсное деление τ на окружности якоря; тогда как полупериоду c -ой гармоники будет соответствовать τ/c -ая часть окружности якоря. Таким образом, для обмоточного коэффициента при любой гармонике ур. (474) гласит:

$$\xi_c = \sin\left(c \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin\left(c \cdot \frac{w}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(c \cdot \frac{s}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{c \cdot \frac{s}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}} \cdot \frac{c \cdot \frac{t}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}}{\sin\left(c \cdot \frac{t}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right)} \dots \dots \dots (505)$$

В диаметральных обмотках ($w = \tau$) и бесконечно большом числе пазов ($t \approx 0$) оба первых и последний множители в ур. (505) равны 1. Мы имеем тогда для различных гармоник:

при шестизонной обмотке (В, § 2):

$$\begin{array}{cccccc} c = & 1 & 3 & 5 & 7 & 9 & 11 \\ \xi_c = & 0,955 & 0,637 & 0,191 & -0,136 & -0,212 & -0,088 \end{array}$$

при трехзонной обмотке:

$$\begin{array}{cccccc} c = & 1 & 3 & 5 & 7 & 9 & 11 \\ \xi_c = & 0,827 & 0 & -0,096 & 0,068 & 0 & -0,043 \end{array}$$

Как видно из таблицы, соответствующим подбором ширины катушек (зоны) можно добиться совершенного уничтожения определенных гармоник. Это имеет место в случае, если

$$\sin \left(c \cdot \frac{s}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2} \right) = 0 \dots \dots \dots (506)$$

$$c \cdot \frac{s}{\tau} \text{ — целое и четное число } \dots \dots \dots (507)$$

Для трехзонной обмотки, встречающейся в однофазных машинах (В, § 2) и в машинах постоянного тока с трехфазными ответвлениями (В, § 2), мы имеем $\frac{s}{2\tau} = \frac{1}{3}$ или $\frac{s}{\tau} = \frac{2}{3}$. Согласно ур. (507) исчезнет, следовательно, третья гармоника и все гармоники, кратные трем.

Для лучшего использования машины на практике при выборе ширины катушки ограничиваются шестизонной или трехзонной обмоткой и принимают обмоточные коэффициенты, приведенные в таблице.

Сделав обмотку хордовой (ширина катушки w меньше полюсного деления τ), мы этим самым значительно ослабляем гармоники. Если принять

$$c \cdot \frac{w}{\tau} = \text{целому и четному числу, } \dots \dots \dots (508)$$

то обмоточный коэффициент c -ой гармоники согласно ур. (505) будет равен нулю; в кривой напряжения у зажимов эта гармоника, следовательно, не возникает¹⁾.

На величину гармоник оказывает влияние и соединение фаз. При соединении звездой ур. (458) для c -ой гармоники гласит:

$$E_{\tau c} = 2E_c \sin c \cdot \frac{\pi}{m} \dots \dots \dots (509)$$

Если для какой-либо гармоники

$$\frac{c}{m} = \text{целому числу, } \dots \dots \dots (510)$$

то, согласно ур. (509), она исчезнет в линейном напряжении. Таким образом, в трехфазных машинах с соединением звездой в кривой напряжения у зажимов исчезнет третья гармоника и все высшие гармоники, кратные трем.

Угол сдвига фаз между ЭДС двух соседних фазовых обмоток в симметричной многофазной системе равен

$$\alpha = c \cdot \frac{2\pi}{m} \dots \dots \dots (511)$$

¹⁾ R. Rüdenberg. Über Erzeugung reiner Sinusströme. Elektrotechnische Zeitschrift 1904, H. 13.

Если для какой-либо s -ой гармоники выполнено условие из ур. (510), то ее амплитуды во всех фазовых обмотках будут одинаковы по фазе. При соединении многоугольником все фазовые обмотки соединены последовательно в одну цепь; ЭДС s -ых гармоник, одинаковые по фазе, алгебраически складываются в одну суммарную ЭДС, вызывающую токи короткого замыкания в цепи обмотки и уравновешивающуюся падением напряжения в последней. Во внешней цепи эти ЭДС, однако, не будут действовать, так что соответствующую гармонику невозможно обнаружить в кривой напряжения у зажимов.

Благодаря пазам обмоточные коэффициенты для гармоник увеличиваются еще больше, чем обмоточный коэффициент для основной волны, что явствует из последнего множителя в ур. (505). Для гармоники порядка

$$c = g \cdot \frac{2\pi}{t} = g \cdot \frac{N}{p} \dots \dots \dots (512)$$

кратного (g раз) числу пазов на пару полюсов, последний множитель в ур. (505) становится бесконечно большим. Суммарный обмоточный коэффициент для этой s -й гармоники остается все же конечным, так как два других множителя в ур. (505) одновременно превращаются в нуль. Выразив ширину катушки w через число η пазовых шагов, мы получим

$$w = \eta \cdot t \dots \dots \dots (513)$$

что вместе с ур. (512) дает величину обмоточного коэффициента для ширины катушки

$$\xi_{s_0} = \sin \left(c \cdot \frac{w}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2} \right) = \sin (g \cdot \eta \cdot \pi) \dots \dots \dots (514)$$

Так как g и η — целые числа, то $\xi_{s_0} = 0$. То же самое можно доказать и для другого множителя (ξ_{s_1}) в ур. (505), соответствующего ширине катушки, выразив ширину последней s через целое число пазовых делений.

Результирующий обмоточный коэффициент не может, разумеется, стать больше единицы. При якоре с пазами, для гармоник, порядок которых приблизительно удовлетворяет ур. (512), приведенные выше ослабления обмоточных коэффициентов большей частью снова покрываются, так что эти гармоники (в противоположность гладкому якору) обнаруживаются почти полной своей амплитудой в основной волне ЭДС.

Увеличение амплитуд определенных гармоник происходит от того, что магнитная проводимость по окружности якоря, благодаря пазам, подвергается сильным колебаниям (фиг. 39). Для основной волны влияние пазов сказывается лишь в виде ослабления суммарной магнитной проводимости в воздушном зазоре (коэффициент Картера, ср. А, § 5). Для гармоник порядка, близкого к числу пазов на пару полюсов, может оказаться, что благодаря явлениям интерференции между полями этих гармоник при гладком якоре и волной, обусловленной распределением проводимости в пазах, — суммарная проводимость воздушного зазора в магнитной цепи для этих гармоник уменьшится незначительно, а соответствующий поток через железо якоря при наличии пазов будет для них относительно больше, чем для основной волны. Этот поток пульсирует с высокой частотой порядка частоты гармоник и создает соответствующие гармоники в волне ЭДС. Интерференция будет тем полнее, чем меньше разница между порядком гармоники и числом пазов на пару полюсов. При заданном числе пазов на пару полюсов больше всего будут усиливаться гармоники порядка

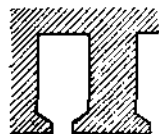
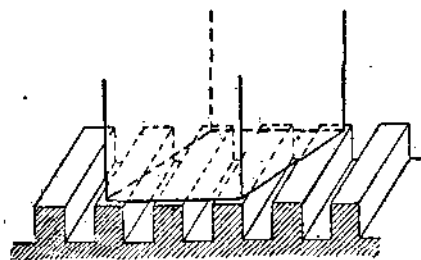
$$c = g \cdot \frac{N}{p} \pm 1 \dots \dots \dots (515)$$

У гармоник порядка, определяемого из ур. (512), полный период волны пространственно равен одному полюсному делению. Таким образом, если, например, одна положительная полуволна гармоники кривой поля расположена против зубца, то все остальные положительные полуволны находятся под обоими соседними полюсами магнитной цепи против соответствующих зубцов. Так как суммарный поток этих гармоник проходит в различных направлениях через воздушный зазор под обоими полюсами, то под одним полюсом он будет одинаково направлен с положительными полуволнами кривой поля, а под другим полюсом он будет совпадать по направлению с отрицательными полуволнами кривой поля. В рассматриваемом случае положительные полуволны кривой поля под одним полюсом находятся против зубцов, тогда как отрицательные полуволны расположены под другим полюсом против пазов якоря. Следовательно, для этой гармоники суммарная магнитная проводимость в воздушном зазоре при наличии пазов будет меньше, чем при гладком якоре. Гармоника не будет так сильно выступать в волне ЭДС.

Резюмируя, можно сказать следующее: определенные гармоники могут усиливаться пазами якоря; однако, для этого они должны иметься уже в кривой поля гладкого якоря. Определяющими факторами для усиления гармоник является, с одной стороны, обмоточный коэффициент пазов, а с другой — неравномерное распределение магнитной проводимости на окружности якоря. Больше всего усиливаются гармоники порядка, найденного из уравнения (515)¹⁾.

Этим самым диктуются и способы борьбы с этими гармоническими составляющими ЭДС. Выполнением

Фиг. 174. Скашивание полюсного башмака для ослабления высших гармоник паза.



Фиг. 175. Полузакрытый паз.

правильного очертания полюсного башмака (в § 2) необходимо добиться того, чтобы кривая поля, отнесенная к гладкому якору, не содержала никаких гармоник (в особенности опасных гармоник порядка, определяемого из ур. 515). Обмоточный коэффициент пазов обуславливается тем, что ЭДС в проводах различных пазов сдвинуты во времени на разные фазы, так как они вступают под полюс толчкообразно через короткие промежутки времени. Плавное (без толчков) и непрерывное набегание проводов под полюс может быть достигнуто скашиванием пазов на одно полюсное деление относительно башмаков, или, что в магнитном отношении то же самое, скашиванием краев полюсных башмаков на одно полюсное деление относительно пазов (фиг. 174).

Коэффициент Картера (А, § 5) является мерой для неравномерности проводимости на окружности якоря из-за наличия пазов. Было уже доказано, что этот коэффициент будет тем меньше, чем больше воздушный зазор и чем меньше входная щель паза. Если из-за возбуждения невозможно выбрать достаточно большой воздушный зазор, то рекомендуется заменить удобный в смысле изготовления открытый паз полузакрытым (фиг. 175). Благодаря этому гармоники паза значительно ослабляются.

¹⁾ R. Rüdenberg. Einfluss der Nuten auf die Wirkungsweise der Dynamoanker. Elektrotechnik u. Maschinenbau, 1907, S. 599. — R. Richter. Ankerwicklungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen. Springer, Berlin 1920, S. 367. — A. Mandl. Die Nutenharmonischen in der Spannungskurve von Drehstromgeneratoren. Elektrotechnik u. Maschinenbau. 18. 325. 1926.

Другим способом для ослабления гармоник, созданных пазами в кривой индуктированной ЭДС, является выбор так называемых обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу ¹⁾. В этих обмотках $q = \frac{N}{2p \cdot m}$ не целое число.

Таким образом, и число пазов на одно полюсное деление ($\frac{N}{2p} = q \cdot m$) не будет целым числом; зубцы и пазы лежат при этом различно под различными полюсами. Пазовые гармоники в обеих катушечных сторонах, лежащих под соседними полюсами, сдвигаются друг относительно друга по фазе и, таким образом, исчезают частично или полностью.

Следует, кроме того, отметить, что кривая распределения поля, созданного одной лишь обмоткой возбуждения, действительна только для холостого хода. При нагрузке эта кривая поля, как и в машине постоянного тока (см. А, § 6), искажается благодаря полю якоря.

Однако, именно при нагрузках бывают желательны синусоидальные кривые напряжения. Этого можно достигнуть, как не трудно в этом убедиться, не путем соответствующего выполнения полюса, а лишь путем правильного выбора обмотки (с дробным числом пазов, хордовой).

§ 3. Устройство синхронной машины.

Для лучшего проведения аналогии между синхронной машиной и машиной постоянного тока мы до сих пор не рассматривали механической конструкции синхронной машины.

При относительном движении полюсов и обмотки якоря в принципе безразлично, какая из этих систем связана с неподвижной и какая — с подвижной частью машины. Так как для синхронной машины не существует проблемы коммутации (свойственной машине постоянного тока), то якорь ее выполняют на неподвижной части (статоре) машины. Такое устройство имеет то преимущество, что головки обмоток здесь могут быть хорошо изолированы как одна от другой, так и от железа; это особенно необходимо в больших генераторах переменного тока, в которых сказываются разрушающее действие коротких замыканий в сети.

Кроме того, при высоких напряжениях и больших токах удобнее получать энергию от неподвижных зажимов статорной обмотки, а обмотку ротора питать через контактные кольца лишь небольшим током возбуждения; исключение составляют одноякорные преобразователи, у которых обмотка якоря должна обладать коллектором для присоединения к сети постоянного тока, а также и очень малые машины переменного тока, у которых использование пространства при устройстве полюсов на роторе сильно ухудшается.

Для ослабления потерь от вихревых токов активное железо якоря, как и в машинах постоянного тока, делится на тонкие слои плоскостями, перпендикулярными коси машины, т. е. якорь (статор), в зависимости от величины машины, собирается из железных колец или сегментов. Все пакеты железа якоря помещаются в станину из чугуна или стального литья и для предохранения от провертывания закрепляются шпонками или болтами (фиг. 176).

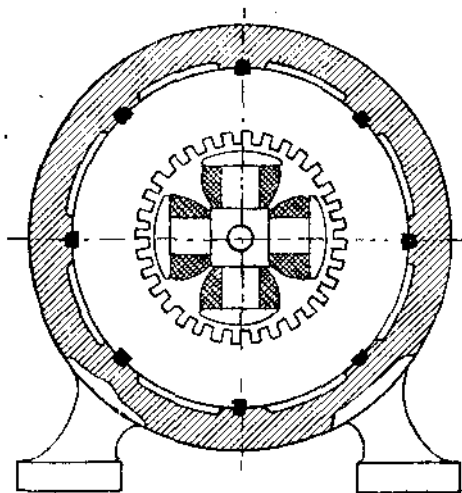
По внутренней окружности листов выштамповываются пазы, в которых закладывается обмотка. Последняя выполняется большей частью однослойной согласно фиг. 166. Зачастую выбирается также и двуслойная обмотка; последняя очень распространена в Америке.

¹⁾ R. Richter. Die Bruchlochwicklungen und ihr Entwurf. Archiv. für Elektrotechnik. S. 214. 1920.

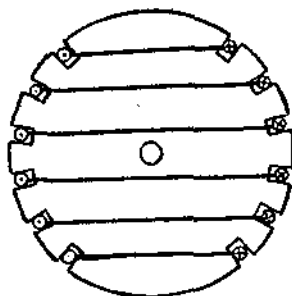
Магнитная система образует в синхронной машине подвижную часть, ротор. При наличии p пар полюсов в одном проводе якоря за полный оборот будут индуцироваться p периодов переменной ЭДС. При n оборотах в минуту ($\frac{n}{60}$ об./сек) индуцируется переменная ЭДС в

$$f = \frac{p \cdot n}{60} \text{ пер/сек.} \quad (516)$$

Так как частота f в большинстве случаев зависит от сети, к которой присоединена машина (В, § 1), а число оборотов n задается машиной, приводящей (или приводимой) во вращение, то число полюсов синхронной машины не может быть произвольно выбрано, как в машине постоянного тока, у которой напряжение у зажимов благодаря коллектору становится независимым от частоты переменной ЭДС в проводах якоря.



Фиг. 176. Остов, якорь и магнитное колесо синхронной машины переменного тока.



Фиг. 177. Ротор с неявными полюсами.

С другой стороны, для синхронных машин при заданной частоте сети (ур. 516) не может быть принято любое число оборотов, так как p должно быть целым числом. Так, для частоты в $f = 50$ пер./сек. возможны лишь следующие числа оборотов:

$p=1$	3 000 об./мин.
2	1 500 "
3	1 000 "
4	750 "
5	600 "
6	500 "
7	428 "
8	375 "

и т. д.

В зависимости от окружных скоростей ротора стали применяться два типа конструкций полюсов синхронной машины.

При больших окружных скоростях (турбогенераторы — выше 75 м/сек) магнитная система выполняется с невыступающими (неявными) полюсами (фиг. 177). Такое устройство применяется во всех 2-полюсных машинах (3 000 об./мин. при $f = 50$ пер./сек.), а также 4- и 6-полюсных машинах большой мощности. Ротор цилиндрической формы снабжается пазами (аналогично якорю машины постоянного тока), в которые закладывается

распределенная по окружности обмотка возбуждения. Приблизительно $\frac{1}{3}$ окружности лишена обмотки. При питании такой распределенной обмотки возбуждения постоянным током в воздушном пространстве между ротором и статором создается поле трапецеидальной формы (фиг. 169 с), весьма близкой к синусоидальной. Постоянный поток, созданный постоянным возбуждением, благодаря обмотки возбуждения, пространственно связан неподвижно с телом ротора. Так как никаких периодических изменений потока в якоре во времени и в пространстве не происходит, то нет необходимости делить его на отдельные листы. Ротор с невыступающими полюсами может быть откован из массивной стали; после этого в нем протрагиваются пазы.

При малых окружных скоростях и большом числе полюсов, а также в 4-х и 6-полюсных машинах малой мощности магнитная система выполняется в виде ротора с выступающими полюсами (фиг. 176). Обмотка возбуждения наносится здесь, как и в машине постоянного тока, на сердечник полюса. Желательное распределение поля в воздушном зазоре достигается здесь соответствующим очертанием полюсного башмака. Из тех же соображений, что и при машине с неявными (невыступающими) полюсами, полюса могут быть изготовлены из массивного железа. Однако, принимая во внимание потери на поверхности полюсных башмаков, последние при открытых пазах большей частью собираются из листов; зачастую собирается из листов и весь полюс. Выполняя полюсный башмак массивным, следует выбирать возможно большим отношение воздушного зазора к входной щели паза (полузакрытые пазы).

Обмотки возбуждения присоединены к двум вращающимся контактным кольцам, к которым через щетки подводится постоянный ток.

Мощность для возбуждения может быть взята от имеющейся сети постоянного тока (постороннее возбуждение); изменение тока возбуждения осуществляется при помощи регулятора, последовательно включенного в цепь возбуждения, в сопротивлении которого поглощается часть постоянного напряжения питающей сети. Такая регулировка неэкономична. Поэтому для синхронной машины часто предусматривают отдельную машину для возбуждения (собственное возбуждение), сидящую большей частью на одном валу с главной машиной. Машина-возбудитель строится в виде шунтовой машины постоянного тока. Изменение тока возбуждения синхронной машины достигается здесь тем, что при помощи шунтового регулятора соответственно меняется напряжение машины-возбудителя.

§ 4. Поле якоря.

Вокруг электрических токов создается магнитное поле. Для какого-либо замкнутого пути магнитодвижущая сила равна ампер-виткам, охватываемым замкнутой линией пути (ур. 43):

$$\text{МДС} = \oint H \cdot dl = I \cdot w \dots \dots \dots (517)$$

Для катушечной стороны, распределенной по окружности якоря (фиг. 178), можно определить нейтральную ось a , по обе стороны которой индукционные линии проходят через воздушный зазор в противоположных направлениях. По нейтральной оси напряжение поля в воздушном зазоре равно нулю. Выбирая за путь интегрирования часть индукционной линии с одной стороны нейтральной оси и самую ось, а также пренебрегая неболь-

шим магнитным напряжением в железе по пути интегрирования, мы получим для замкнутой цепи:

$$\oint \frac{H \cdot dl}{0,4 \cdot \pi} = \frac{H_x \cdot \delta_x}{0,4 \cdot \pi} = \int_0^x A \cdot dx, \dots \dots \dots (518)$$

где H_x и δ_x — напряжение поля и ширина воздушного зазора в том месте x , где индукционная линия проходит через зазор; A — линейная нагрузка (ур. 81).

Кривая

$$\int_0^x A \cdot dx = f(x) \dots \dots \dots (519)$$

называется кривой поля возбуждения в обмотке. Кривая поля возбуждения является, следовательно, интегральной кривой линейной нагрузки. Каждая из обеих катушечных сторон обмотки переменного тока покрывает обычно (при шестизонной обмотке

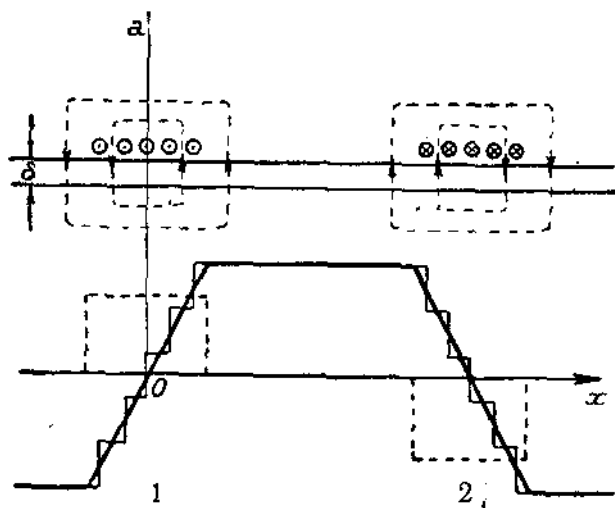
В, § 2) $\frac{1}{3}$ полюсного деления. Кривая поля возбуждения у такой катушки имеет форму трапеции, узкая сторона которой равна $\frac{2}{3}$ полюсного деления [в обмотках постоянного тока катушечная сторона расположена на всем полюсном делении; кривая поля возбуждения имеет поэтому форму треугольника (фиг. 47а)]. В действительности ампер-витки катушечной стороны распределяются по окружности якоря не так равномерно, как это вытекает из понятия о линейной нагрузке, а сосредотачиваются в пазах статора; поэтому ампер-витки, охваченные индукционными линиями, изменяются также не непрерывно, а скачкообразно; кривая поля возбуждения получает ступенчатую форму, как это видно из фиг. 178.

Теоретическая кривая поля возбуждения в машинах переменного тока имеет синусоидальное распределение по окружности якоря:

$$f(x) = V \sin x, \dots \dots \dots (520)$$

где V — максимальное значение кривой возбуждения поля.

Если пропускать постоянный ток через три фазовые обмотки машины трехфазного тока, то распределению объема тока в каждой фазе будут соответствовать три распределенные по окружности якоря синусоидальные (в идеальном случае) кривые поля возбуждения. Их амплитуды сдвинуты одна относительно другой на механический угол $\frac{1}{p} \cdot \frac{2\pi}{3}$ (соответственно электрическому углу $\frac{2\pi}{3}$) благодаря тому, что три фазовые обмотки

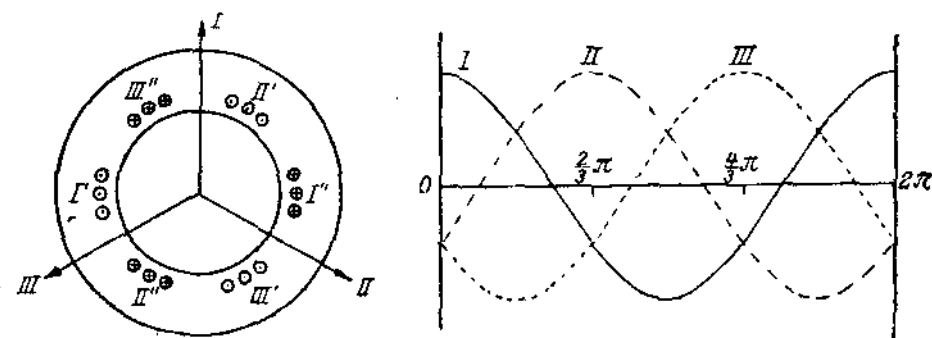


Фиг. 178. Объем тока и кривая поля возбуждения распределенной обмотки.

распределены в пространстве по окружности якоря (фиг. 179). Для любого места x на окружности якоря кривые возбуждения поля трех фаз имеют следующие значения:

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= V_1 \sin px \\ v_2 &= V_2 \sin \left(px - \frac{2\pi}{3} \right) \\ v_3 &= V_2 \sin \left(px - \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (521)$$

При питании обмотки постоянным током амплитуды V_1 , V_2 и V_3 равны и постоянны. При питании фазовых обмоток переменными токами кривые поля возбуждения пульсируют как стоячие волны около оси абсцисс, при чем их значения для каждого места на окружности якоря изменяются



Фиг. 179. Кривые поля возбуждения трехфазной обмотки при питании постоянным током.

синусоидально во времени. При симметричной трехфазной системе амплитуды тока в трех фазовых обмотках сдвинуты одна относительно другой во времени на $\frac{1}{3}$ периода $\left(\frac{2\pi}{3} \right)$. Соответственно этому изменения амплитуд кривых возбуждения поля во времени выразятся для трех фаз:

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= V_0 \sin \omega t \\ V_2 &= V_0 \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ V_3 &= V_0 \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (522)$$

Подставляя эти значения в ур. (521) и сложив эти уравнения, мы получим уравнение результирующей кривой поля возбуждения всех трех фазовых обмоток;

$$v = V_0 \left[\sin \omega t \cdot \sin px + \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \sin \left(px - \frac{2\pi}{3} \right) + \right. \\ \left. + \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \cdot \sin \left(px - \frac{4\pi}{3} \right) \right] \dots \dots (523)$$

или после некоторых преобразований:

$$v = 1,5 \cdot V_0 \cdot \cos (\omega t - px) \dots \dots \dots (524)$$

Это выражение представляет собою уравнение волны, движущейся с постоянной угловой скоростью и распределенной синусоидально в про-

странстве. Угловую скорость вращения можно определить, задаваясь условием постоянства некоторого значения v :

$$v = 1,5 \cdot V_0 \cdot \cos(\omega t - px) = \text{const.} \quad (525)$$

т.-е.

$$\omega t - px = \text{const} \quad (526)$$

или, дифференцируя:

$$\omega dt - p dx = 0, \quad (527)$$

отсюда:

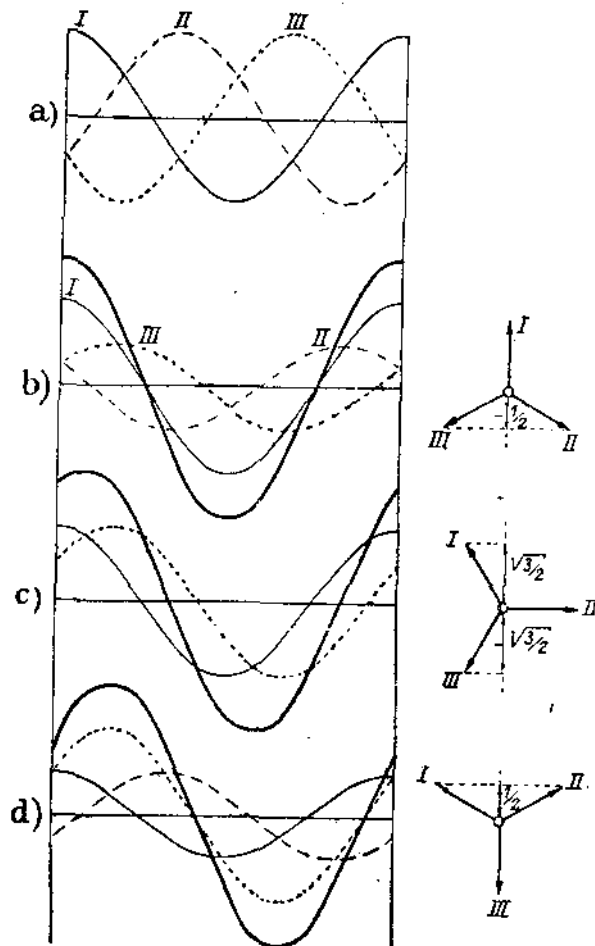
$$\Omega = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{p} \quad (528)$$

Результирующая кривая поля возбуждения в обмотке трехфазной машины, питаемой трехфазным переменным током, будет, следовательно, в идеальном случае синусоидально распределена по окружности якоря; ее амплитуда составляет 1,5-кратную величину амплитуды кривой возбуждения поля отдельной фазовой обмотки; она вращается с угловой скоростью, равной механической угловой скорости магнитной системы

$$\left(\Omega_m = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\omega}{p}; \text{ ср. ур. 29} \right),$$

т.-е. синхронно. Действительная кривая поля возбуждения должна быть построена по ступенчатым кривым трехфазовых обмоток; она, вообще говоря, ближе к синусоиде, чем каждая из ее составляющих; во время вращения форма действительной кривой возбуждения поля меняется периодически.

Наглядная картина кривой поля возбуждения представлена на фиг. 180. Здесь *a* показывает пространственное распределение кривых возбуждения поля в трехфазовых обмотках (для двух полюсных делений) при питании постоянным током. Если обмотка питается переменным током, то мгновенные значения фазовых токов определяются как проекции трех векторов вращающейся звезды на неподвижную линию времени. На фигурах



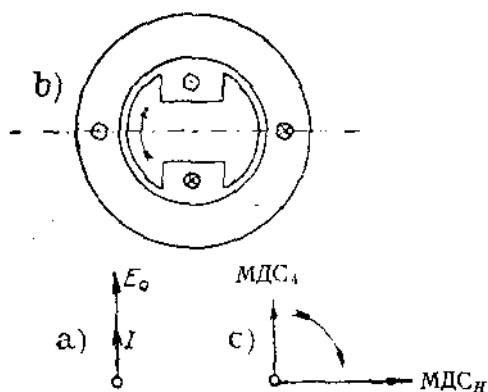
Фиг. 180. Результирующая кривая поля возбуждения трехфазной обмотки.

b, *c* и *d* нанесены для трех моментов, следующих один за другим на $\frac{1}{12}$ периода, кривые возбуждения поля в трех фазах с амплитудами, соответствующими мгновенным значениям токов в векторной диаграмме, и

с распределением в пространстве согласно фиг. а; кроме того определена и результирующая кривая возбуждения поля. Кривые подтверждают правильность приведенных выше рассуждений.

По кривой возбуждения поля и ширине воздушного зазора из ур. (518) определяется распределение индукции на окружности якоря, т.е. кривая поля обмотки якоря. Кривая поля якоря вращается синхронно с магнитной системой (вращающееся поле), так же, как и кривая возбуждения поля. Поле якоря сохраняет поэтому свое положение относительно магнитной системы независимо от вращательного движения машины. Соотношения здесь такие же, как в машине постоянного тока, в которой поле якоря неподвижно относительно магнитной системы (А, § 6).

Поле якоря налагается на главное поле и вместе образуют результирующее поле. При том же возбуждении главного поля, при нагрузке машины создается поэтому другая ЭДС, чем при холостом ходе. Для того, чтобы иметь возможность определить результирующее поле, необходимо



Фиг. 181. МДС якоря и полюсов при совпадении по фазе силы тока и ЭДС.

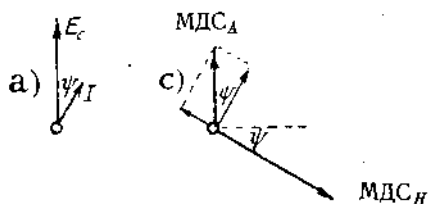
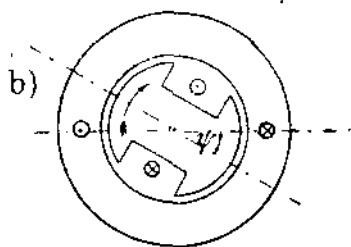
индуктированной в этом витке при холостом ходе (фиг. 19 и 20). Эта ЭДС достигает своего максимума, когда ось полюсов совпадает с плоскостью витка. Если максимальное значение ЭДС, индуктированной при холостом ходе, совпадает во времени с максимальным значением силы тока в витке, иначе говоря, если ЭДС холостого хода E_0 совпадает во времени по фазе с током в якоре I (фиг. 181 а), то этому будет соответствовать положение оси полюсов относительно витков, изображенное на фиг. 181 б, и оба поля будут взаимно-перпендикулярны (фиг. 181 с). Здесь соотношения такие же, как и в машине постоянного тока при расположении щеток в геометрической нейтральной зоне (фиг. 46).

Следует упомянуть, что зависимость между полями и направлением вращения здесь такая же, как и в машинах постоянного тока: в генераторе трехфазного тока механическое усилие, приложенное к ротору, стремится отдалить МДС главного поля от МДС поля якоря, следовательно, увеличить угол между ними; обратно, в синхронном двигателе пондеромоторная сила стремится повернуть МДС главного поля в направлении МДС поля якоря, следовательно, уменьшить угол между ними (стр. 46). Однако, так как поле якоря в качестве вращающегося поля перемещается синхронно с ротором, то при постоянной нагрузке угол будет оставаться неизменным.

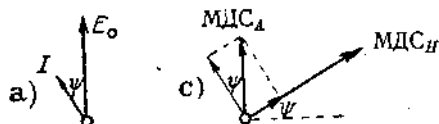
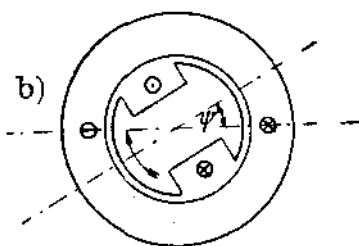
знать относительно положение главного поля и поля якоря. Фиг. 180 показывает, что результирующая кривая поля возбуждения совпадает в пространстве по фазе с кривой поля возбуждения одной фазы как раз в тот момент, когда в последней проходит максимальная сила тока. Таким образом, поле якоря на фиг. 181 можно охарактеризовать витком, в котором мгновенное значение силы тока равно максимальному (амплитуде); ось витка представляет тогда направление магнитодвижущей силы якоря в пространстве. Направление МДС главного поля задается осью полюсов. Положение оси полюсов относительно витка определяется мгновенным значением ЭДС,

При различных условиях нагрузки и возбуждения машины случается, что ЭДС холостого хода не совпадает во времени по фазе с током якоря. На фиг. 182а представлен случай, когда ток в якоре отстает во времени от ЭДС холостого хода на угол ψ . В этом случае, когда ток достигает в витке своего максимального значения, ось полюсов оказывается уже впереди плоскости витка на пространственный угол ψ/p (в рассматриваемом случае $p=1$; фиг. 182b). В векторной диаграмме (фиг. 182c) МДС больше не перпендикулярны одна к другой.

Аналогичный случай получается в машине постоянного тока при сдвиге щеток из геометрической нейтральной зоны; благодаря этому ось обмотки якоря (ось щеток) сдвигается относительно оси полюсов (А, § 6).



Фиг. 182. МДС якоря и полюсов при отстающем токе.



Фиг. 183. МДС якоря и полюсов при опережающем токе.

Блондель¹⁾ считает целесообразным при исследовании явлений в машинах с выступающими полюсами разлагать МДС якоря, принятую синусоидальной, на две составляющие в пространстве; одна из них (продольное поле) имеет амплитуду $MDC_A \cdot \sin \psi$ и совпадает по направлению с главным полем; амплитуда $MDC_A \cdot \cos \psi$ другой составляющей (поперечное поле) расположена перпендикулярно к направлению главного поля.

В рассматриваемом примере главное поле ослабляется продольной слагающей поля якоря. Если ток опережает ЭДС холостого хода генератора (фиг. 183), то угол между МДС главного поля и поля якоря становится меньше, чем 90° , так что главное поле усиливается продольной слагающей поля якоря.

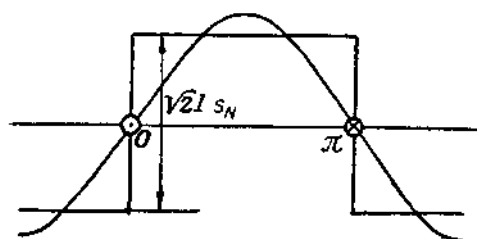
Для работы двигателем вышеприведенные рассуждения, видоизмененные соответствующим образом, также справедливы. При тех же ампер-витках в обмотках якоря и полюсов (фиг. 181, 182, 183) направление вращения при работе двигателем (вращение влево) обратно направлению вращения при работе генератором (вращение вправо). Таким образом, при том же положении оси полюсов относительно плоскости витка отставание тока для генератора становится опережением тока для двигателя и наоборот.

После того, как определено положение МДС якоря относительно МДС главного поля, необходимо найти также и их амплитуды. Согласно

¹⁾ Blondel. Über die Theorie von Wechselstrommaschinen. L'industrie Electrique, 10. u. 25. Nov. 1899.

фиг. 178, кривая возбуждения поля фазовой обмотки представляет собою ломаную трапецевидную линию, что объясняется наложением кривых поля возбуждения отдельных витков. Соответственно этому можно определить основную волну кривой поля возбуждения одной фазовой обмотки, для чего налагают одну на другую основные волны кривых возбуждения поля отдельных витков или частичных катушек.

Прямоугольная кривая возбуждения поля одной частичной катушки, сосредоточенной в двух пазах, ширина которой равна полюсному делению, представлена на фиг. 184; скачкообразное изменение линии объясняется ампер-витками паза в соответствующем месте. При питании катушки синусоидальным переменным током I для момента максимума тока ордината прямоугольной кривой поля возбуждения будет равна $\sqrt{2} I \cdot \frac{s_N}{2}$, где s_N — число проводов в одном пазу. По методу Фурье амплитуда основной волны этой кривой возбуждения поля получается равной:



Фиг. 184. Кривая поля возбуждения частичной катушки.

$$\left. \begin{aligned} V_0 &= \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sqrt{2} I \frac{s_N}{2} \sin x \, dx = \\ &= \sqrt{2} \cdot \frac{I \cdot s_N}{2} \cdot \frac{4}{\pi} = 0,9 \cdot I \cdot s_N \end{aligned} \right\} \quad (529)$$

При распределении катушечной стороны по q пазам мы получим для ее кривой поля возбуждения амплитуду основной волны, равную:

$$V_0 = 0,9 \cdot I \cdot s_N \cdot \xi \cdot q, \quad \dots \quad (530)$$

где обмоточным коэффициентом ξ (ур. 474) учитывается распределение катушки. Амплитуда результирующей кривой поля возбуждения при трехфазной обмотке в $\frac{3}{2}$ раза больше (а при m -фазной обмотке в $\frac{m}{2}$ раза больше), амплитуд кривой поля возбуждения одной фазы.

$$\left. \begin{aligned} V_m &= \frac{m}{2} \cdot 0,9 \cdot I \cdot s_N \cdot \xi \cdot q = 0,45 \cdot \xi \cdot q \cdot s_N \cdot m \cdot I = \\ &= 0,45 \cdot \xi \cdot \frac{w}{p} \cdot I = 0,45 \cdot \xi \cdot A \cdot \tau \end{aligned} \right\} \quad \dots \quad (531)$$

Для однофазных обмоток амплитуда кривой поля возбуждения задана ур. (530). Кривая поля возбуждения образует здесь пульсирующую стоячую волну на окружности якоря. Стоячая волна может быть разложена на две волны с половинной амплитудой, бегущие в противоположные направления. Одна волна бежит синхронно с магнитной системой и создает синхронное вращающееся поле, образующее вместе с главным полем результирующее поле машины. Другая волна бежит в противоположном направлении с такой же скоростью, следовательно, в отношении магнитной системы со скоростью, соответствующей двойной частоте; благодаря этому обратному вращающемуся полю возникают токи в железе полюсов (вихревые токи) и в обмотках магнитов, демпфирующие значительную часть создающего их поля.

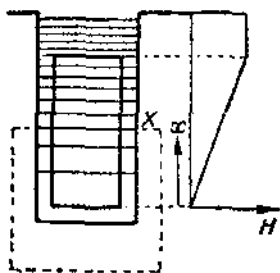
Часть потока, созданного токами в якоре, проходит по путям, совершенно отличным от путей главного потока, и сопряжена к тому же лишь с отдельными витками. Эта часть потока якоря называется потоком рассея-

ния. В зависимости от его местонахождения различают поток рассеяния в пазах и поток рассеяния у лобовых соединений.

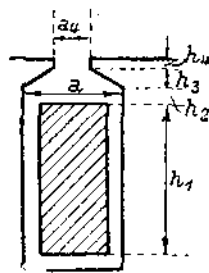
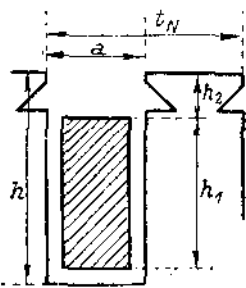
Мерой для величины поперечного пазового поля в каком-либо месте X паза (фиг. 185) является МДС, возникающая от ампер-витков, сопряженных в этом месте с индукционной линией, и магнитная проводимость пути, пронизываемого этой линией. Если пренебречь магнитным сопротивлением железа в сравнении с сопротивлением воздуха, то ширина паза в соответствующем месте станет мерой для магнитного сопротивления вдоль индукционной линии. Зная, следовательно, геометрические размеры паза и распределение тока в пространстве, можно определить пространственное распределение поперечного пазового потока.

При изменении последнего в витках, сцепленных с ним, будет индуцироваться ЭДС.

Лишь часть поперечного потока в пазу сцеплена со всеми витками, расположенными в последнем; остальная часть сопряжена неполностью с объемом тока в пазу. Практически следует ввести здесь некоторый



Фиг. 185. Поперечное поле паза.



Фиг. 186. Форма паза.

расчетный (теоретический) пазовый поток рассеяния Φ_N' , который, находясь в полном сцеплении с объемом тока в пазу, при любом своем изменении во времени, будет индуцировать в обмотке якоря ту же ЭДС, что и действительный неполностью сцепленный поток рассеяния.

$$\Phi_N' = S_N \cdot I \cdot \sqrt{2} \cdot \Lambda_N \quad (532)$$

Здесь Φ_N' — максимальная величина расчетного пазового потока рассеяния в тот момент, когда каждый из S_N проводов паза пропускает максимальную силу тока $I \sqrt{2}$. Число проводов в пазу равно

$$S_N = \frac{z \cdot m}{N} = \frac{z}{2p \cdot q} = \frac{w}{p \cdot q} \quad (533)$$

где z — число проводов одной фазы, w — число витков одной фазы и m — число фаз обмотки.

Расчетная магнитная проводимость паза равна

$$\Lambda_N = 0,4\pi \cdot l_i \cdot \lambda_N \quad (534)$$

Здесь l_i — расчетная длина якоря и λ_N — коэффициент проводимости (не имеющий размерности), который может быть определен из геометрических размеров паза и пространственного распределения объема тока в пазу¹⁾.

$$\lambda_N = \frac{h_1}{3a} + \frac{h_2}{a} + 2,3 \cdot \frac{h_3}{a - a_4} \cdot \log \frac{a}{a_4} + \frac{h_4}{a_4} \quad (535)$$

Обозначения h и a соответствуют фиг. 186. При совершенно открытых пазах оба последних члена ур. (535) отпадают.

¹⁾ M. Schenkell. Elektrotechnik und Maschinenbau. 1911. Heft 50 und 51.

Для того, чтобы освободиться в ур. (532) от величин силы тока I и числа проводов или витков, введем здесь понятие эффективного значения линейной нагрузки A , равномерно распределенной по окружности якоря

$$A = \frac{I \cdot m \cdot w}{p \cdot \tau}, \dots \dots \dots (536)$$

что вместе с ур. (533) и (534) видоизменяет ур. (532):

$$\Phi_N' = A \cdot l_i \cdot \tau \cdot 0,4 \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\lambda_N}{q \cdot m} \text{ максвелл} \dots \dots \dots (537)$$

Введя для геометрических размеров паза (фиг. 376) определенные соотношения (например, для открытого паза: $h_1 = \frac{3}{4} h$; $h_2 = \frac{3}{16} h$; $a = 0,45 t_N$), мы можем представить коэффициент проводимости в виде $\lambda_N = c \frac{h}{t_N}$ (ур. 535), где c — постоянная и t_N — величина пазового деления. Таким образом, вместе с ур. (537) мы имеем:

$$\begin{aligned} \Phi_N' &= A \cdot l_i \cdot \tau \cdot 0,4 \pi \cdot \sqrt{2} \cdot c \frac{h}{m \cdot q \cdot t_N} = \\ &= A \cdot l_i \cdot \tau \cdot \left[0,4 \pi \cdot \sqrt{2} \cdot c \frac{h}{\tau} \right] \text{ максвелл} \end{aligned} \dots \dots \dots (538)$$

Если ток в якоре, а следовательно и поток рассеяния паза Φ_N' , изменяется синусоидально во времени, то в проводах, сопряженных с потоком Φ_N' , будет индуцироваться ЭДС ур. (485). Согласно определению расчетного пазового потока рассеяния, последний полностью сопряжен со всеми $2w$ проводами одной фазовой обмотки. Таким образом, ЭДС рассеяния паза равна, согласно ур. (486):

$$\begin{aligned} E_N &= 4,44 \cdot w \cdot f \cdot A \cdot l_i \cdot \tau \left[2 \cdot 0,4 \pi \cdot \sqrt{2} \cdot c \frac{h}{\tau} \right] \cdot 10^{-8} = \\ &= 4,44 w \cdot f \cdot A \cdot l_i \cdot \tau \cdot \zeta_N \cdot 10^{-8} \text{ вольт,} \end{aligned} \dots \dots \dots (539)$$

где

$$\zeta_N = f \left(\frac{h}{\tau} \right) \dots \dots \dots (540)$$

Лобовый поток рассеяния пронизывает воздушное пространство, окружающее головки обмоток якоря, а также незначительную часть железа близлежащих частей машины. В головках катушек сосредоточены в группы витки нескольких пазов. В трехфазных двухэтажных обмотках (В, § 7) фазовая обмотка состоит из p катушечных групп с q частичными катушками каждая (следовательно, $q \cdot s_N$ витков); в однофазных обмотках (В, § 2) и в трехфазных трехэтажных обмотках фазовая обмотка состоит из $2p$ катушечных групп с $\frac{q}{2}$ частичными катушками в каждой (следовательно, $\frac{q \cdot s_N}{2}$ витков). Таким образом, при прочих равных условиях лобовой поток рассеяния вокруг головки одной катушки при устройстве первого типа будет в два раза больше, чем при устройстве второго типа. Целесообразно все же подсчитывать по той же формуле и лишь для коэффициента проводимости во втором случае подставлять половинное значение.

Расчетная величина лобового потока рассеяния одной катушечной группы из q частичных катушек получается равной (учитывая ур. 533):

$$\Phi_s' = q \cdot s_N \cdot I \cdot \sqrt{2} \cdot \Lambda_s = \frac{w}{p} \cdot I \cdot \sqrt{2} \cdot \Lambda_s \dots \dots \dots (541)$$

Здесь расчетная магнитная проводимость равна

$$\Lambda_s = 0,4\pi \cdot l_s \cdot \lambda_s \dots \dots \dots (542)$$

Средняя длина лобовых соединений l_s и коэффициенты проводимости λ_s зависят от устройства обмоток. Согласно Рихтеру¹⁾, можно в среднем принять для:

$$\begin{array}{ll} \text{трехфазных двухэтажных обмоток} & \dots \dots l_s = 2,2\tau; \lambda_s = 0,3, \\ \text{однофазных обмоток} & \dots \dots l_s = 1,8\tau; \lambda_s = 0,15, \\ \text{трехфазных трехэтажных обмоток} & \dots \dots l_s = 2,4\tau; \lambda_s = 0,225. \end{array}$$

Для заданной обмотки можно поэтому писать:

$$l_s \cdot \lambda_s = c' \cdot \tau,$$

где c' — постоянная величина. Опираясь на ур. (538), мы получим вместе с ур. (536) следующее уравнение для расчетного лобового потока рассеяния:

$$\Phi_s' = A \cdot \tau \cdot \frac{0,4\pi \cdot \sqrt{2}}{m} \cdot c' \cdot \tau = A \cdot l_i \cdot \tau \left[\frac{0,4\pi \cdot \sqrt{2} \cdot c'}{m} \cdot \frac{\tau}{l_i} \right] \text{ максвелл} \dots (543)$$

Каждый виток сцеплен с двойным лобовым потоком рассеяния, так как с обеих лобовых сторон якоря этот виток входит в катушечные головки. Таким образом, ЭДС лобового рассеяния для w витков одной фазовой обмотки равна

$$\begin{aligned} E_s &= 4,44 \cdot w \cdot f \cdot A \cdot l_i \cdot \tau \left[\frac{2 \cdot 0,4\pi \cdot \sqrt{2} \cdot c'}{m} \cdot \frac{\tau}{l_i} \right] \cdot 10^{-8} = \left. \begin{aligned} &= 4,44 \cdot w \cdot f \cdot A \cdot l_i \cdot \tau \cdot \zeta_s \cdot 10^{-8} \text{ вольт,} \end{aligned} \right\} \dots \dots (544) \end{aligned}$$

где

$$\zeta_s = f \left(\frac{\tau}{l_i} \right) \dots \dots \dots (545)$$

Вся ЭДС, индуктированная полями рассеяния в обмотке якоря, получится из ур. (539) и (544)

$$E_s = E_N + E_s = 4,44 \cdot w \cdot f \cdot A \cdot l_i \cdot \tau \cdot (\zeta_N + \zeta_s) \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \dots \dots (546)$$

Сравнив это выражение с уравнением для ЭДС, индуктированной главным потоком (ур. 503 и 496):

$$E = 4,44 \cdot \xi \cdot k_f \cdot w \cdot f \cdot B \cdot l_i \cdot \tau \cdot a \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \dots \dots \dots (547)$$

и разделив одно уравнение на другое, мы находим:

$$\frac{E_s}{E} = \frac{\zeta_N + \zeta_s}{\xi \cdot k_f \cdot a} \cdot \frac{A}{B} = \zeta \cdot \frac{A}{B} \dots \dots \dots (548)$$

Реакцию рассеяния принято выражать в процентах от номинального напряжения. Для B принимают поэтому значение индукции в воздухе при холостом ходе с номинальным напряжением. Коэффициент рассеяния ζ в весьма широких пределах имеет лишь слабое отклонение от некоторого среднего значения²⁾. Для полюсных делений от 30 до 60 см, глубины паза от 50—80 мм и отношения $\frac{l_i}{\tau} = 0,9 \div 1,2$ можно в среднем принять для трехфазных обмоток:

$$\begin{array}{ll} \text{при открытых пазах} & \dots \dots \dots \zeta = 4, \\ \text{„ полузакрытых пазах} & \dots \dots \dots \zeta = 5. \end{array}$$

¹⁾ R. Richter. Elektrische Maschinen, S. 291. Berlin, 1924.

²⁾ K. Pichelmayer. Dynamobau (Handb. der Elektrotechnik 5). 503 ff., Leipzig, 1908.

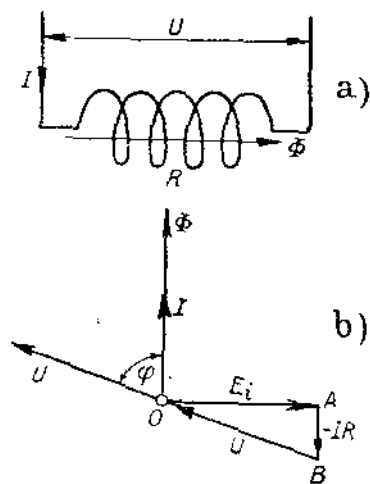
§ 5. Векторная диаграмма и рабочий процесс синхронной машины.

Так как в литературе векторными диаграммами пользуются самым разнообразным образом, то мы предварительно приведем здесь несколько правил, по которым строились нижеприведенные диаграммы ¹⁾. Направление вращения векторов сохраняем принятое раньше (В, § 1). При сложении двух векторов их располагают в последовательном порядке по направлению их стрелок.

Для замкнутой цепи второй закон Кирхгофа гласит:

$$\Sigma E + \Sigma (-I \cdot R) = 0 \dots \dots \dots (549)$$

или, словами: сумма всех напряжений в замкнутой цепи равна нулю. При этом омическое падение напряжения ($-I \cdot R$) рассматривается как ЭДС, направленная противоположно силе тока, а потому в векторной диаграмме напряжений такому падению следует придать направление, противоположное силе тока.



Группа векторов дает в сумме нуль в том случае, если при построении диаграммы конец последнего вектора совпадает с началом первого. Таким образом, ур. (549) может быть сформулировано для векторов следующим образом: для замкнутой цепи последовательно сложенные векторы напряжения образуют замкнутый контур.

Поток, созданный током, откладывается на векторной диаграмме в фазе с последним, так как изменение этих обеих величин совпадает по времени. Индуцированная ЭДС отстает от создающего ее потока на $\frac{1}{4}$ периода ($\frac{\pi}{2}$) (А § 2, фиг. 14).

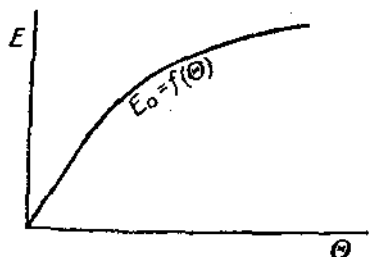
Фиг. 187. Направления в векторной диаграмме.

Пусть, например, к дроссельной катушке с омическим сопротивлением R приложено переменное напряжение U (фиг. 187а). При этом пусть проходит ток I , создающий в дроссельной катушке поток Φ . Если для вектора силы тока I выбрать в диаграмме какое-либо направление (фиг. 187б), то этим самым определится и направление потока Φ . Напряжения, возникающие в этой замкнутой цепи, следующие: OA — ЭДС E_i , индуцированная потоком и отстающая от него на $\frac{\pi}{2}$, AB — омическое падение напряжения ($-I \cdot R$), направленное, согласно вышесказанному, противоположно току I ; BO — приложенное напряжение у зажимов U . Все три вектора должны образовать замкнутый треугольник. На фиг. 187б напряжение у зажимов U отложено вторично от точки O ; из этого построения видно, что ток I отстает от напряжения U на угол φ . Так как φ меньше 90° , то проекция вектора I на вектор U будет совпадать по направлению с последним; это означает отдачу мощности от сети с напряжением U (сравни также А, § 10). Вектор омического падения напряжения ($-I \cdot R$) направлен

¹⁾ М. Kloss. Vorzeichen- und Richtungsregeln für Wechselstrom-Vektordiagramme. Wiss. Veröff. a. d. Siemenskonzern. 2. Berlin, 1922.

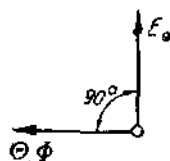
противоположно силе тока; это означает восприятие мощности сопротивлением.

В векторной диаграмме все величины должны изменяться с одинаковой частотой по закону синуса. В дальнейшем поэтому для синхронной машины будут приниматься чисто синусоидальные изменения напряжений, токов и магнитных потоков. Правда, поток полюсов и ток, его создающий, представляют собою величины, не меняющиеся во времени; однако, в отношении витка обмотки якоря, при синхронной окружной скорости, пронизывающий поток полюсов меняется синусоидально во времени (при синусоидальном распределении в пространстве) с частотой ЭДС якоря, созданной этим потоком. Можно поэтому на векторной диаграмме наносить также и поток полюсов, а в фазе с ним и ток возбуждения. Вращающаяся магнитная система действует здесь как преобразователь частоты, превращающий постоянный ток обмоток возбуждения в ток переменный по отношению к статору машины. Следовательно, вращающуюся магнитную систему можно мысленно заменить неподвижной обмоткой, питаемой переменным



Фиг. 188. Характеристика холостого хода.

током. Созданный такой системой магнитный поток пронизывает обмотку статора и индуцирует в ней ЭДС. Такое устройство известно в электротехнике под названием трансформатора. И действительно, согласно Петерсену¹⁾, на неподвижном трансформаторе можно доказать все свойства синхронной машины переменного тока (за исключением механических свойств).



Фиг. 189. Векторная диаграмма при холостом ходе.

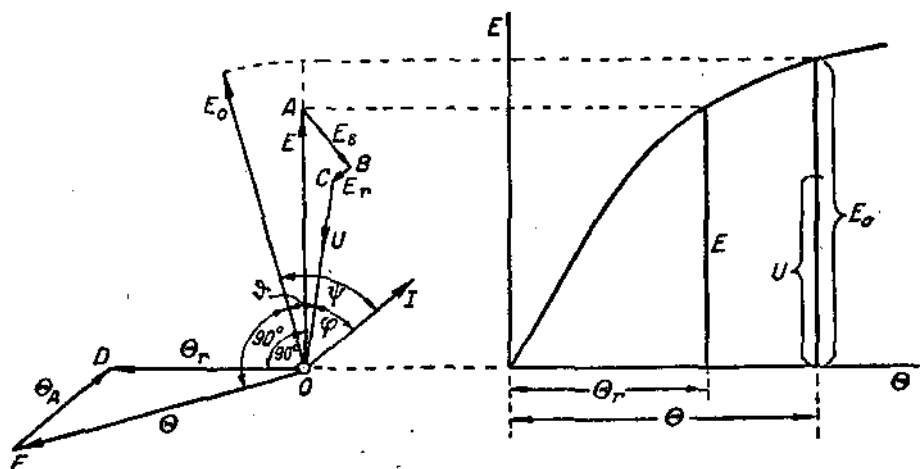
Так как благодаря насыщению в железе магнитной цепи не существует пропорциональности между МДС и созданными потоками, то при построении векторной диаграммы машины требуется знание ее магнитной характеристики. Последняя подсчитывается по тем же правилам, что и для машины постоянного тока (сравни. А, § 5); поэтому ограничимся здесь ссылкой на пример, подсчитанный ниже.

Особенно просто получается векторная диаграмма в машине с неявными полюсами; сопротивление магнитной цепи для потока якоря не зависит от положения ротора относительно статора (ср. фиг. 181, 182, 183) и равно магнитному сопротивлению в цепи главного потока. Как кривая поля возбуждения якоря, так и кривая поля возбуждения магнитов распределены синусоидально по окружности якоря (последняя кривая точнее трапециoidalна); благодаря наложению обеих кривых возникает, следовательно, синусоидально распределенная результирующая кривая поля возбуждения. Соответствующие векторы в диаграмме можно поэтому геометрически складывать.

На фиг. 188 нанесена ЭДС E_0 , индуцированная при холостом ходе, в функции от ампер-витков Θ магнитной цепи (характеристика холостого хода). Фиг. 189 изображает векторную диаграмму времени при холостом ходе для определенного числа ампер-витков Θ ; индуцированная ЭДС отстает от создающего ее потока Φ (или соответствующих ампер-витков Θ) на угол $\frac{\pi}{2}$.

¹⁾ W. Petersen. Wechselstrommaschinen (Bd. III von „Allgemeine Elektrotechnik“). Einleitung und S. 123, Stuttgart, 1910.

При правильном включении машины в сеть индуцированная ЭДС будет направлена почти противоположно напряжению сети (А, § 10). Напряжение у зажимов, отличающееся от ЭДС только на величину внутреннего падения напряжения машины, равно и противоположно напряжению сети. При нагрузке машины в качестве генератора сила тока и напряжение у зажимов будут почти одинаково направлены (отдача мощности машиной), следовательно, сила тока будет направлена почти противоположно напряжению сети (восприятие мощности сетью). На фиг. 190 показана векторная диаграмма синхронной машины с неявными полюсами, нагруженной в качестве генератора. Здесь взят ток, отстающий от напряжения у зажимов на $\angle \varphi$ (или опережающий напряжения сети на $\angle 180^\circ - \varphi$). Замкнутая ломаная линия $OABCO$ представляет собою диаграмму напряжения замкнутой цепи. Вектор $OA = E$ изображает ЭДС, индуциро-



Фиг. 190. Векторная диаграмма и характеристика холостого хода „перевозбужденного“ синхронного генератора переменного тока.

ванную результирующим полем в обмотке статора; $AB = E_s$ — ЭДС, индуцированная полями рассеяния согласно ур. (546) и изображаемая вектором, отстающим от создающего ее потока (или равного ему по фазе тока в якоре) на угол $\frac{\pi}{2}$; $BC = E_r = -I \cdot R$ — вектор омического падения напряжения, направленный противоположно току I ; $CO = U$ — напряжение сети. Обратно, при заданных значениях напряжения сети, тока нагрузки и угла сдвига фаз φ можно при помощи постоянных машины определить из диаграммы напряжений величину ЭДС E . Из характеристики холостого хода получают результирующие ампер-витки θ_r , необходимые для создания ЭДС E . Как вектор, величина θ_r опережает созданную ею ЭДС E на угол $\frac{\pi}{2}$. Вектор результирующих ампер-витков θ , является геометрической суммой векторов ампер-витков полюсов θ и ампер-витков якоря θ_A . Аналогично ампер-виткам полюсов ампер-витки якоря определяются здесь как

$$\theta_A = 2V_m, \dots \dots \dots (550)$$

где V_m — амплитуда результирующей кривой поля возбуждения якоря (ур. 531). Как вектор, величина θ_A имеет направление тока якоря. Таким образом, из фиг. 190 можно определить по величинам θ_r и θ_A потребное

возбуждение магнитов Θ при нагрузке. Соответствующая ЭДС E_0 при холостом ходе может быть взята из характеристики холостого хода и нанесена на векторной диаграмме, как отстающая от возбуждающих ее ампер-витков Θ на угол $\frac{\pi}{2}$. При отключении нагруженного генератора от сети напряжение у зажимов возрастает от U до E_0 .

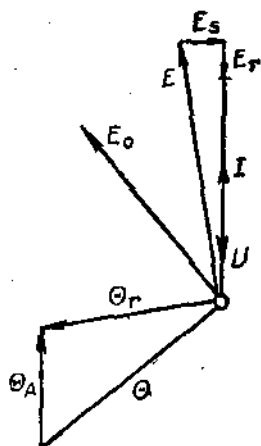
Величину

$$\Delta E\%_0 = \frac{E_0 - U}{U} \cdot 100 \dots \dots \dots (551)$$

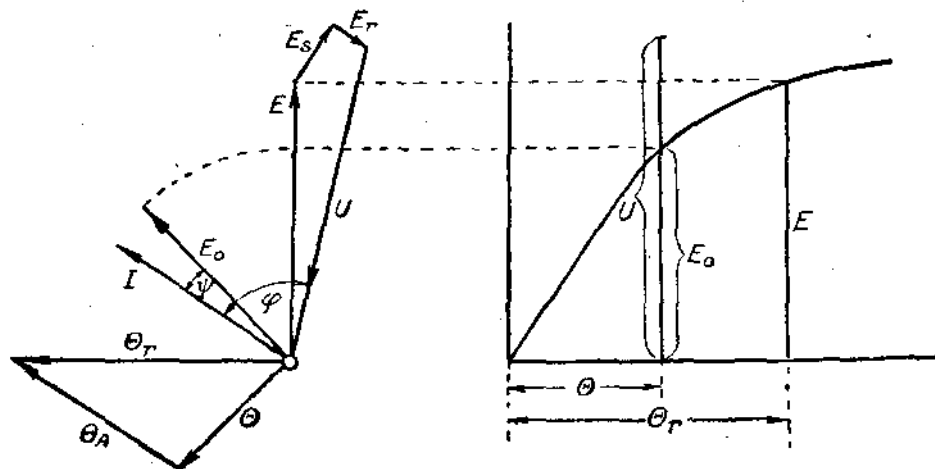
называют процентным изменением напряжения; она может быть положительной или отрицательной.

Угол между ЭДС E_0 и силой тока I называется внутренним углом сдвига фаз ψ .

Если генератор присоединен к сети, питаемой еще несколькими другими генераторами, то соответствующей установкой возбуждения можно достигнуть того, что ток будет совпадать по фазе с напряжением у зажимов ($\cos \varphi = 1$); при этом генератор „правильно“ возбужден (фиг. 191). При усилении возбуждения напряжение все же не может возрасти, так как оно поддерживается другими генераторами сети. Таким образом, для того, чтобы снова довести усилившееся поле до величины результирующего, соответствующего напряжению (точнее говоря ЭДС), вектор тока должен быть больше повернут в направлении, противоположном результирующему возбуждению (фиг. 190). В перевозбужденном генераторе ток, следовательно, отстает от напряжения у зажимов.



Фиг. 191. Векторная диаграмма „нормально возбужденного“ генератора.

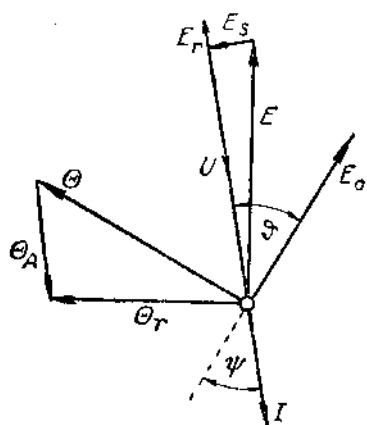


Фиг. 192. Векторная диаграмма и характеристика холостого хода „невозбужденного“ генератора.

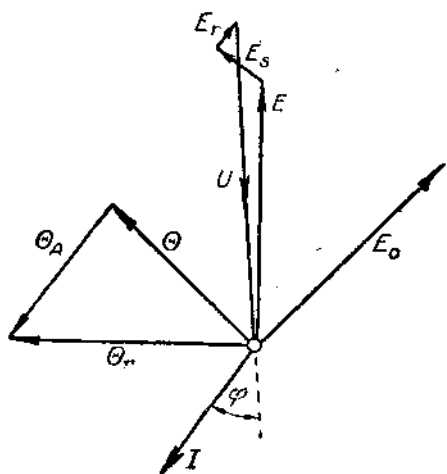
При ослаблении возбуждения получившееся поле оказывается недостаточным для создания ЭДС, соответствующей напряжению сети. В этом случае вектор тока поворачивается так, что ампер-витки полюсов усиливаются ампер-витками якоря (фиг. 192). В недовозбужденном генераторе ток опережает напряжение у зажимов. Как показано

на фиг. 192, при выключении генератора из сети напряжение у зажимов ослабляется.

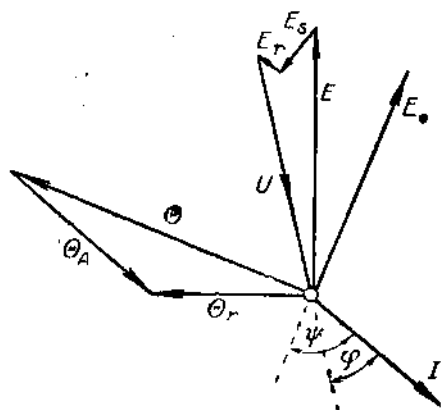
При работе генератора на отдельную сеть его коэффициент мощности ($\cos \varphi$) определяется нагрузкой. В этом случае изменение возбуждения влечет за собою соответствующее изменение напряжения у зажимов.



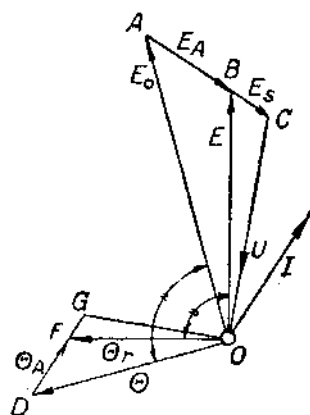
Фиг. 193. Векторная диаграмма „правильно возбужденного“ синхронного двигателя.



Фиг. 194. Векторная диаграмма „невозбужденного“ синхронного двигателя.



Фиг. 195. Векторная диаграмма „перевозбужденного“ синхронного двигателя.



Фиг. 196. Упрощенная векторная диаграмма.

У двигателя ток направлен почти противоположно индуцированной ЭДС (восприятие мощности машиной) и почти совпадает по направлению с напряжением сети. Векторная диаграмма (фиг. 193, для $\cos \varphi = 1$) строится по тому же принципу, что и для генератора. Недовозбужденный двигатель (фиг. 194) воспринимает ток, отстающий от напряжения сети U . Перевозбужденный двигатель (фиг. 195) воспринимает ток, опережающий напряжение сети. Благодаря таким особенностям перевозбужденные синхронные двигатели

часто применяются для улучшения сдвига фаз в больших сетях (фазовые компенсаторы). Так как большинство потребителей (асинхронные двигатели, трансформаторы и т. д.) воспринимают отстающий ток, то вектор тока в диаграмме будет поворачиваться по направлению часовой стрелки от напряжения сети. В качестве активной мощности участвует только слагающая тока в направлении напряжения. Таким образом, при большем $\Delta \varphi$ провода нагружены большими токами, чем это требуется для соответствующей активной мощности. В местах, где сосредоточена нагрузка, часто устанавливают поэтому перевозбужденные синхронные двигатели, сближающие вектор тока с вектором напряжения.

В векторной диаграмме двигателя вектор E_0 (зависящий в пространственном отношении, так же как и ампер-витки полюсов θ , от положения полюсов) отстает на $\Delta \theta$ от вектора напряжения у зажимов, противоположного вектору напряжения сети; в векторной же диаграмме генератора вектор E_0 опережает напряжение у зажимов. Образно выражаясь, можно себе представить, будто при генераторе приложенное к вектору E_0 (ротору) механическое усилие увлекает за собой при помощи упругого соединения вектор напряжения у зажимов (сеть), тогда как в случае двигателя напряжение у зажимов (сеть) увлекает за собой вектор E_0 (ротор). В действительности $\Delta \theta$ является мерой передаваемого момента вращения.

Для доказательства введем некоторые упрощения, количественно хотя и искажающие картину, но все же значительно облегчающие рассмотрение качественной стороны проблемы. Принимая прямолинейную характеристику, мы получим из фиг. 196 (ср. фиг. 190):

$$\frac{E_0}{E} = \frac{\theta}{\theta_r}, \quad \dots \dots \dots (552)$$

кроме того:

$$\Delta BOA = \Delta FOD.$$

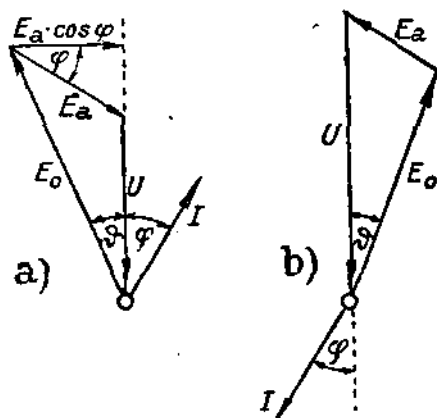
Таким образом,

$$\Delta ABO \sim \Delta DFO \text{ и } DF \perp AB;$$

величина $AB = E_A$ имеет, следовательно, то же направление, что и E_s . Омическое падение напряжения составляет от 1 до 5% (меньшее значение для быстроходных роторов) от напряжения сети U и им можно поэтому пренебречь. Рассматривая оба вектора E_A и E_s как один вектор E_s , мы получим характеристический треугольник (ΔACO) синхронной машины, который может быть представлен и в виде ΔDGO из векторов ампер-витков.

На фиг. 197а показан характеристический треугольник для перевозбужденного генератора, а на фиг. 197b — для недовозбужденного двигателя.

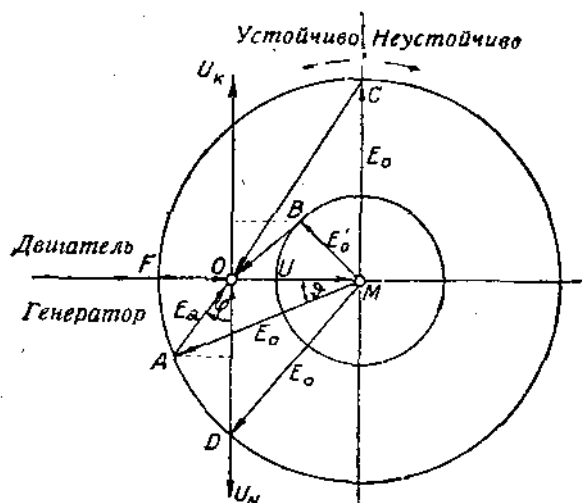
При помощи характеристического треугольника представляется возможным объединить все возможные условия работы синхронной машины в одну круговую диаграмму (фиг. 198), соответствующую диаграмме Гейланда (Heyland) для асинхронной машины. Для этого наносят постоянное



Фиг. 197. Характеристический треугольник синхронной машины.

напряжение сети U в виде горизонтального отрезка OM и на нем строят треугольники для различных условий нагрузки. При постоянном возбуждении ротора конец вектора E_0 перемещается по окружности с центром M . На фиг. 198 нанесены две окружности: одна для сильного возбуждения (E_0) и одна для слабого (E'_0). $\triangle OMA$ соответствует фиг. 197a (перевозбужденный генератор), $\triangle OMB$ соответствует фиг. 197b недовозбужденный двигатель). $\triangle OMD$ характеризует работу генератором для $\cos \varphi = 1$. Величина E_a пропорциональна току и отстает от него на 90° . Для простоты отсчета угла сдвига фаз φ на круговой диаграмме вектор напряжения сети U поворачивают на 90° по часовой стрелке (U_N на фиг. 198; напряжение у зажимов U_k равно и противоположно U_N).

Не трудно убедиться в том, что нижняя половина круговой диаграммы представляет область работы генератором, а верхняя половина — область работы двигателем (E_a в нижней половине окружности почти противоположно напряжению сети U_N и совпадает по направлению с напряжением у зажимов U_k , в верхней же половине наоборот). Проекция вектора E_a на вектор напряжения сети (или, что то же, напряжение у зажимов; $E_a \cos \varphi \sim I \cos \varphi$) является мерой для активного тока, а тем самым, при постоянном напряжении сети, также и для активной мощности; благодаря постоянному числу оборотов синхронной машины величина $E_a \cos \varphi$ (если пренебречь внутренними потерями) также является мерой для момента вращения.



Фиг. 198. Круговая диаграмма синхронной машины.

Из фиг. 198 следует, что с увеличением нагрузки при постоянном возбуждении возрастает также и $\angle \delta$ между напряжением у зажимов U и ЭДС холостого хода E_0 , следовательно, и угол отклонения ротора от своего положения при холостом ходе относительно статора. Максимальный момент вращения (опрокидывающий момент) для заданного возбуждения достигается тогда, когда угол отклонения составляет $\delta = 90^\circ$ электрических градусов. Такой случай представлен треугольником $\triangle OMC$ на фиг. 198 при работе двигателем. Больший момент вращения может быть достигнут лишь усилением возбуждения. Синхронный двигатель не может преодолеть момент нагрузки больший, чем его опрокидывающий момент; он выпадает из синхронизма и останавливается. Аналогично этому происходит дело и при генераторе: если момент вращения, приложенный от машины-двигателя, окажется большим, чем опрокидывающий момент генератора, то последний не будет в состоянии развить соответствующий противодействующий момент, угол δ станет больше, чем 90° , ротор „провернется“ и машина „пойдет в разнос“. Дело происходит так, как будто из-за превзойденного опрокидывающего момента ($\delta = 90^\circ$) перегружается и разрывается упругое соединение между сетью и ротором, благодаря чему совместная синхронная работа прекращается. Отношение опрокидывающего момента к нормальному моменту вращения характеризует способность машины

к перегрузке. Если для машины желательна высокая способность к перегрузкам, то при расчете следует выбирать большее отношение $\frac{E_0}{E_a}$ или, согласно фиг. 196, отношение $\frac{\theta}{\theta_A}$.

Обозначив через X эквивалентное безваттное сопротивление машины, учитывающее суммарную реакцию якоря (результатирующее поле и поля рассеяния якоря), мы получим:

$$E_a = I \cdot X \dots \dots \dots (553)$$

Для прямолинейной магнитной характеристики мы имеем $X = \text{const}$. Если замкнуть зажимы генератора накоротко, то получится $U = 0$ и точка C на фиг. 196 совпадет с точкой O . Ток короткого замыкания I_k , текущий через машину, возрастет до таких размеров, что его поля создадут ЭДС E_a , равную и противоположную ЭДС E_0 , индуцированной полюсами:

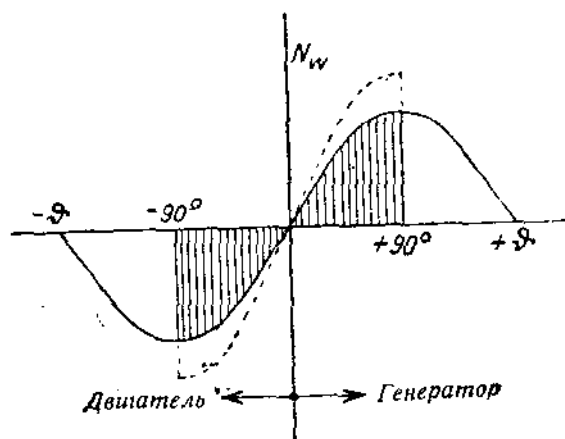
$$E_0 = E_a = I_k \cdot X \dots \dots \dots (554)$$

После этих определений можно активную мощность машины выразить из фиг. 197а следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} N_w &= \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} U \cdot \frac{E_a}{X} \cdot \cos \varphi = \\ &\sqrt{3} \cdot U \cdot \frac{E_0}{X} \sin \theta = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_k \cdot \sin \theta \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (555)$$

Для заданного возбуждения $I_k = \text{const}$. Таким образом, при сделанных упрощениях, активная мощность при постоянном возбуждении будет синусоидальной функцией от угла отклонения θ , в чем легко убедиться также и из фиг. 198. На фиг. 199 эта функция нанесена в прямолинейной системе координат. Область устойчивой работы заштрихована. Благодаря увеличению возбуждения усиливается ток короткого замыкания, а тем самым и активная мощность при заданном угле отклонения (пунктирная кривая).

Если при неизменной активной нагрузке ($E_a \cdot \cos \varphi = \text{const}$) возбуждение (E_0) синхронной машины меняется, то конец вектора E_0 передвигается по прямой, параллельной оси абсцисс (фиг. 200). Каждой активной мощности соответствует другая прямая



Фиг. 199. Активная мощность в функции от угла отклонения θ .

соответствует другая прямая мощности совпадает с осью абсцисс; геометрическая сумма трех векторов (характеристический треугольник) дает скалярную сумму. Одновременно с изменением возбуждения (E_0) при постоянной активной мощности меняется также и величина тока (E_a) и угла сдвига фаз φ . При помощи фиг. 200 можно простым путем уяснить себе вопрос об опережении и отставании при недо возбуждении и перевозбуждении как для генератора, так и для двигателя (см. выше). При „правильно возбужденном“ генераторе (ΔOAF) ток совпа-

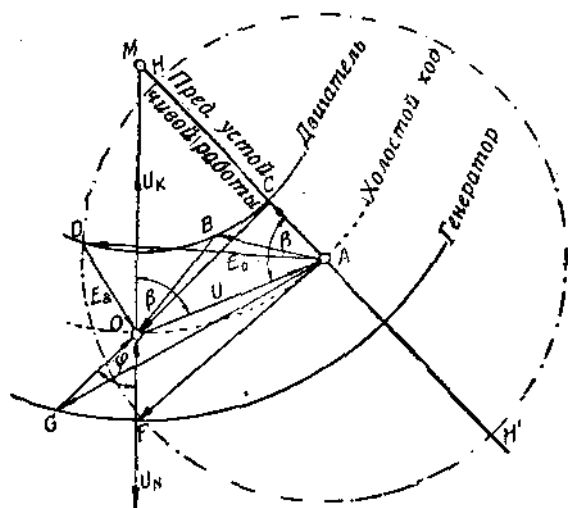
случаев постоянную мощность; опасность выпадения из синхронизма здесь значительно меньшая (ср. кроме того, параллельная работа), удобная же регулировка, учитывая легкое перераспределение безваттной мощности при параллельной работе, весьма желательна. Учитывая возможность повреждения машин, выключателей и проводов в случае короткого замыкания, необходимо при проектировании генераторов (в особенности для большой мощности) следить за тем, чтобы ток короткого замыкания не был слишком велик. Последний будет тем меньше, чем больше рассеяние обмотки статора. Это требование [ведет также к низким значениям отношения $\frac{\theta}{\theta_{\text{г}}}$ (ур. 548).

Диаграмма на фиг. 196 была представлена без учета омического сопротивления. Если учитывать последнее, то каждая прямая мощности на фиг. 200 (при постоянном напряжении у зажимов и постоянной механической мощности) перейдет в окружность с центром в точке M (фиг. 202), лежащим на стороне двигателя ¹⁾. Угол β , определяющий положение точки M , находится из уравнения:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{X}{R} \quad (556)$$

Для $R=0$ фиг. 202 переходит, следовательно, в фиг. 200.

Диаграмма на фиг. 202 называется диаграммой тока ²⁾ синхронной машины. Наноса силу тока в функции от возбуждения при постоянной активной нагрузке, можно и здесь получить V-образные кривые.



Фиг. 202. Диаграмма тока.

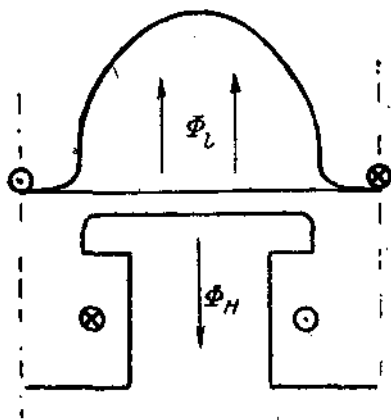
Наименьшее возбуждение, при котором синхронная машина еще отдает или получает определенную механическую мощность, достигается тогда, когда вектор E_0 совпадает по направлению с AM (AC на фиг. 202). При уменьшении возбуждения машина выпадает из синхронизма. Угол отклонения полюсов здесь не равен $\vartheta=90^\circ$, как это было найдено при пренебрежении омическим сопротивлением, а будет при двигателе $\vartheta=\beta$ и при генераторе $\vartheta=180^\circ-\beta$. Таким образом, благодаря омическому сопротивлению область устойчивой работы для двигателя уменьшается, а для генератора увеличивается. Реактивное сопротивление ($X=L\cdot\omega$) пропорционально частоте. Поэтому может случиться, что при некоторой низкой частоте (например, при пусковой частоте) омическое сопротивление R настолько превзойдет реактивное сопротивление X , что синхронная машина при работе двигателем будет выпадать из синхронизма уже при незначительной механической нагрузке (угол отклонения на границе опрокидывания $\vartheta=\beta=\arctg \frac{X}{R}$ очень мал).

¹⁾ Рассмотрение этой диаграммы завело бы нас слишком далеко; ограничимся поэтому ссылкой на вышеназванные учебные пособия.

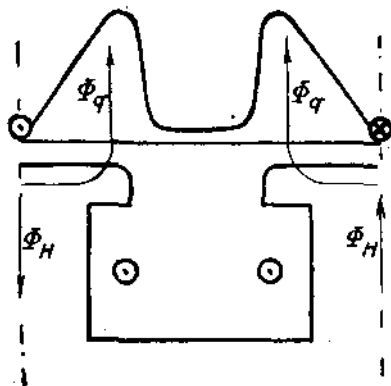
²⁾ или еще круговой диаграммой.

При учете омического сопротивления рабочая диаграмма синхронной машины (фиг. 198) (для постоянного возбуждения) изменяется также аналогично диаграмме тока. Вместо прямолинейной абсциссы на фиг. 198 получается окружность холостого хода из фиг. 202. Рабочую окружность можно получить для любого возбуждения; для этого достаточно описать окружность из точки A радиусом, равным соответствующему вектору E_0 (AD на фиг. 202). В точках H и H' рабочая окружность пересекает прямую устойчивости; здесь, следовательно, достигается максимальная механическая (опрокидывающая) мощность машины при данном возбуждении.

В машинах с явными полюсами полярная диаграмма не так проста, как в машине с неявными полюсами. Благодаря явным полюсам магнитное сопротивление ротора (являющееся мерой для величины по-



Фиг. 203. Поле якоря и полюса при $\psi = 90^\circ$.



Фиг. 204. Поле якоря и полюса при $\psi = 0^\circ$.

тока якоря) различно в зависимости от положения оси полюсов относительно максимального значения поля якоря. Это положение зависит от внутреннего угла сдвига фаз ψ между ЭДС холостого хода E_0 и током в якоре I (В, § 4).

При $\psi = 90^\circ$ ось полюсов совпадает с положением максимального значения поля якоря в пространстве. В этом положении ротор представляет наименьшее магнитное сопротивление для потока якоря. Индукционные линии потока якоря проходят по тому же пути, что и главный поток (продольный поток якоря) (фиг. 203). При встречающейся на практике ширине полюсного башмака в этом положении большая часть МДС поля якоря находится под полюсным башмаком.

При $\psi = 0$ (фиг. 181) максимальное значение МДС якоря расположено против междуполюсного пространства. При этом может образоваться в якоре лишь незначительный поток (фиг. 204), так как магнитное сопротивление в междуполюсном пространстве велико. Небольшие значения МДС якоря против полюсных башмаков встречают значительно меньшее магнитное сопротивление. Здесь, следовательно, возникает поток, проходящий дважды через воздушный зазор и замыкающийся через полюсный башмак в направлении, поперечном к главному потоку (поперечный поток якоря).

При углах сдвига фаз ψ , колеблющихся между 0 и 90° , поток якоря встречает сопротивление, величина которого колеблется между заданными предельными значениями. При той же кривой поля якоря (том же токе

в якоре Λ) кривая поля полюсов, в зависимости от положения последних, может принять разнообразные формы, а следовательно, поток может оказаться самым разнообразным по величине.

Таким образом, ЭДС, индуктированная полем якоря, также не является однозначной функцией кривой поля возбуждения, или, что то же самое, ампер-витков якоря Θ_A . Поэтому невозможно учитывать эту ЭДС в полярной диаграмме при помощи вектора, пропорционального ампер-виткам якоря.

Согласно Блонделя (В. § 4), синусоидально распределенную кривую поля якоря разлагают на две синусоидальные составляющие с максимальными значениями $\frac{\Theta_A}{2} \cdot \sin \psi$ и $\frac{\Theta_A}{2} \cdot \cos \psi$, где $\frac{\Theta_A}{2}$ — максимальное значение кривой поля (ур. 550).

Максимальное значение первой составляющей совпадает по направлению с осью полюсов (фиг. 182 и 183).

Поток, соответствующий этой составляющей, встречает то же магнитное сопротивление, что и главный поток. Поэтому можно алгебраически сложить (учитывая знак и распределение в пространстве) составляющую ампер-витков якоря $\Theta_A \cdot \sin \psi$ с ампер-витками полюсов; при этом мы получим результирующие продольные ампер-витки, которым будет соответствовать продольная ЭДС E_p , индуктированная в обмотке якоря.

Максимальное значение второй составляющей $\frac{\Theta_A}{2} \cdot \cos \psi$ расположено против междуполусного пространства (фиг. 204); соответствующий поперечный поток Φ_q в основном зависит от магнитного сопротивления в воздушном зазоре под полюсами, дважды пронизываемом магнитным потоком. ЭДС, соответствующую поперечному потоку, мы обозначим через E_q .

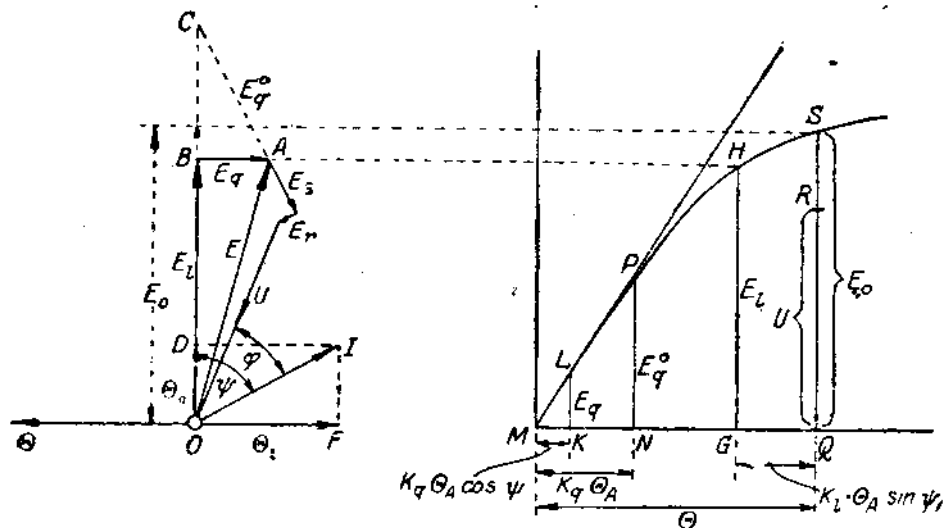
Максимальные значения обеих составляющих ампер-витков сдвинуты друг относительно друга в пространстве на половину полюсного деления, следовательно, на 90 электр. градусов; соответствующие им ЭДС E_p и E_q расположены в диаграмме времени перпендикулярно одна к другой. Геометрическая сумма величин E_p и E_q представляет собою индуктированную ЭДС E . Последняя, как и в машинах с неявными полюсами, слагаясь с ЭДС рассеяния E_s , омическим падением напряжения E_r и напряжением сети U , дает геометрическую сумму, равную нулю. На фиг. 205 представлена для того же случая, что и на фиг. 190 (машина с неявными полюсами) полярная диаграмма для машины с явными полюсами. Здесь принято возбуждение полюсов $\overline{MQ} \sim \Theta$, соответствующее в характеристике холостого хода ЭДС E_0 ($\overline{QS}$). Выбранный ток нагрузки I отстает во времени от ЭДС холостого хода E_0 на угол ψ . Ампер-витки Θ_A пропорциональны силе тока и как вектор совпадают с нею во времени по фазе. Обе их составляющие, по Блонделю, равны: $OF \sim \Theta_A \sin \psi = \Theta_i$ — продольные ампер-витки, $OD \sim \Theta_A \cos \psi = \Theta_q$ — поперечные ампер-витки. Распределение в пространстве кривых полей, соответствующих этим ампер-виткам, вообще говоря, отличается от распределения кривой поля возбуждения полюсов. При помощи соответствующих коэффициентов k_i и k_q можно все же добиться, чтобы ампер-витки якоря, приведенные посредством этих коэффициентов, создавали в качестве полюсных ампер-витков те же эффективные ЭДС, что и действительные. Этим самым все ампер-витки приведены к одинаковому распределению в пространстве (к распределению полюсных ампер-витков). О подсчете коэффициентов k_i и k_q см. ниже.

На фиг. 205 продольные ампер-витки якоря (OF) направлены противоположно полюсным ампер-виткам Θ . Результирующие продольные ампер-витки, следовательно, равны:

$$\overline{MG} = \overline{MQ} - OQ \sim \Theta - k_i \cdot \Theta_i = \Theta - k_i \cdot \Theta_A \cdot \sin \psi \quad \dots \quad (557)$$

Этим ампер-виткам в характеристике холостого хода соответствует продольная ЭДС $GH = E_r$, которую в полярной диаграмме следует нанести в фазе (OB) с ЭДС холостого хода.

При заданных ампер-витках Θ , поперечный поток, а тем самым и созданная им ЭДС E_q , зависят в основном от магнитного сопротивления двойного воздушного зазора (см. выше), так как падением магнитного напряжения в железе при низких насыщениях можно пренебречь. Касательная к прямой части характеристики холостого хода представляет собою характеристику воздушного зазора машины, зависящую от магнитного сопротивления двойного воздушного зазора (ур. 53). Таким образом определяют из характеристики воздушного зазора поперечную ЭДС $KL \sim E_r$.



Фиг. 205. Векторная диаграмма и характеристика холостого хода машины с выступающими полюсами.

для чего в качестве возбуждения наносят поперечные ампер-витки якоря $\overline{MK} \sim k_q \cdot \Theta_q = k_q \cdot \Theta_A \cdot \cos \psi$, приведенные к виду полюсных ампер-витков. В полярной диаграмме вектор $\overline{BA} \sim E_q$ отстает на 90° от вектора поперечных ампер-витков $\overline{OD}$, следовательно, перпендикулярен к E_L .

Геометрическая сумма величин E_L и E_q дает индуктированную ЭДС $\overline{OA} \sim E$, образующую, как в машине с неявными полюсами, вместе с векторами E_a , E_r и U замкнутую ломаную линию.

Рассмотрим теперь, как определяются коэффициенты k_i и k_q для приведения амплитуд кривых поля возбуждения якоря к амплитудам равноценных кривых поля возбуждения полюсов. Для этой цели подсчитаем коэффициенты для наиболее существенного в практике случая, когда воздушный зазор, для достижения синусоидальной кривой поля, выполняется неодинаковым по окружности якоря (фиг. 169а). Подсчет коэффициентов для других условий может быть проделан затем аналогичным образом.

Для простоты предположим, что воздушный зазор по всему полюсному делению соответствует ур. 488. Кривая поля возбуждения обмотки, сосредоточенной в междуполюсном пространстве (а не распределенной в нескольких пазах, как в машине с неявными полюсами), имеет приблизительно

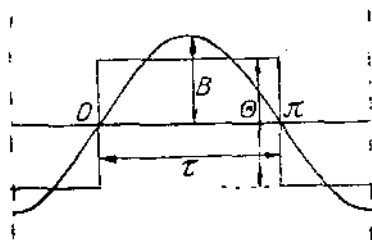
прямоугольную форму (фиг. 206); амплитуда этой кривой равна половине ампер-витков Θ в междупольном пространстве. Если за начальную точку принять середину междупольного пространства, то, согласно вышеприведенного определения, магнитная проводимость λ воздушного зазора будет синусоидальной функцией

$$\lambda = \Lambda \sin x, \dots \dots \dots (558)$$

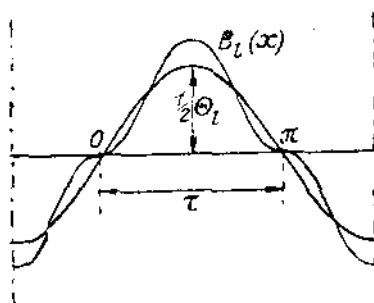
где Λ — магнитная проводимость в середине полюса. Пренебрегая падением магнитного напряжения в железе, мы получим, следовательно, кривую поля (распределение индукции вдоль окружности якоря):

$$B(x) = \frac{\Theta}{2} \cdot \Lambda \cdot \sin x \dots \dots \dots (559)$$

В действительности в междупольном пространстве кривая поля несколько отклоняется от синусоидальной формы (фиг. 169 а), так как



Фиг. 206. Кривая поля возбуждения и кривая ампер-витков обмотки полюсов, при форме полюсного башмака из фиг. 169 а.



Фиг. 207. Кривая поля возбуждения и кривая ампер-витков обмотки якоря при форме полюсного башмака из фиг. 169 а.

условие (ур. 488) для воздушного зазора действительно только под полюсным башмаком. Отклонение, однако, настолько незначительно, что им можно на практике пренебречь.

Амплитуда кривой поля полюсов равна:

$$B = \frac{\Theta}{2} \cdot \Lambda \dots \dots \dots (560)$$

Кривая продольного поля возбуждения якоря распределена синусоидально вдоль окружности якоря (фиг. 207):

$$V_1(x) = \frac{1}{2} \cdot \Theta_1 \cdot \sin x \dots \dots \dots (561)$$

Так как уравнение магнитной проводимости (ур. 558) для продольного поля якоря такое же, как и для поля полюсов, то кривая продольного поля якоря выразится:

$$B_1(x) = \frac{1}{2} \cdot \Theta_1 \cdot \sin x \cdot \Lambda \cdot \sin x = \frac{1}{2} \cdot \Theta_1 \cdot \Lambda \cdot \sin^2 x \dots \dots \dots (562)$$

Эта кривая поля содержит (фиг. 207) сильно выраженную третью гармонику, которая все же, при соединении обмотки якоря звездой, не сказывается в междупольном напряжении (В, § 2).

Раньше было доказано (В, § 2), что гармоники оказывают вообще лишь слабое влияние на эффективное значение индуктированной ЭДС.

Можно поэтому и здесь рассматривать лишь основную волну. Амплитуда основной волны в кривой продольного поля якоря равна

$$B' = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{1}{2} \cdot \Theta_1 \cdot \Lambda \cdot \sin^2 x \cdot \sin x \cdot dx = \frac{4}{3} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \Lambda \cdot \frac{\Theta_1}{2} \dots (563)$$

Ампер-витки полюсов, равноценные продольным ампер-виткам якоря, должны создавать синусоидальную кривую поля с такой же амплитудой, что и последние.

Приравняв ур. (563) к ур. (560), мы получаем:

$$\left. \begin{aligned} B &= B' \\ \frac{\Theta}{2} \cdot \Lambda &= 0,85 \cdot \frac{\Theta_1}{2} \cdot \Lambda, \end{aligned} \right\} \dots (564)$$

$$\Theta = 0,85 \cdot \Theta_1 = k_1 \cdot \Theta_1 = k_1 \cdot \Theta_A \cdot \sin \psi, \dots (565)$$

таким образом, понижительный коэффициент для продольных ампер-витков якоря равен

$$k_1 = 0,85 \dots (566)$$

Аналогичным образом определяется коэффициент k_q . Поперечное поле якоря создает ЭДС E_q , сдвинутую по фазе на 90° относительно ЭДС, созданной полем полюсов; поэтому в сущности нельзя определить действительные ампер-витки полюсов, которые могли бы заменить поперечные ампер-витки якоря. Здесь речь идет об определении полюсных ампер-витков, равноценных по абсолютному значению поперечным ампер-виткам и дающих возможность просто получать из характеристики холостого хода величину ЭДС E_q , индуктированную поперечным потоком.

Максимальное значение кривой поля возбуждения в якоре находится по середине междуполюсного пространства. Уравнение для распределения этой кривой в пространстве, следовательно, выразится:

$$V_q(x) = \frac{1}{2} \cdot \Theta_q \cdot \cos x \dots (567)$$

Кривая поперечного поля якоря равна:

$$B_q(x) = \frac{1}{2} \cdot \Theta_q \cdot \cos x \cdot \Lambda \cdot \sin x \dots (568)$$

Амплитуда основной волны кривой поля возбуждения равна, следовательно:

$$B' = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \frac{1}{2} \cdot \Theta_q \cdot \cos x \cdot \Lambda \sin x \cdot \sin x \cdot dx = \frac{4}{3\pi} \cdot \Lambda \cdot \frac{\Theta_q}{2} \dots (569)$$

Снова приравняв между собою амплитуды основных волн кривой поля полюсов и кривой поля якоря (ур. 569), мы найдем условие равноценности обоих ампер-витков:

$$\frac{\Theta}{2} \cdot \Lambda = 0,425 \cdot \Lambda \cdot \frac{\Theta_q}{2}, \dots (570)$$

отсюда мы получаем:

$$\Theta = 0,425 \cdot \Theta_q = k_g \cdot \Theta_q = k_g \cdot \Theta_A \cdot \cos \psi \dots (571)$$

При этом предполагается, что по середине междуполюсного пространства воздушный зазор теоретически бесконечно велик, следовательно,

магнитная проводимость равна нулю. Практически проводимость здесь также не будет равна нулю. Принимают поэтому

$$k_g = 0,45 \dots \dots \dots (572)$$

Таким образом определены основные величины, необходимые при построении полярной диаграммы для машины с явными полюсами.

На практике имеется еще одна трудность, заключающаяся в том, что внутренний угол сдвига фаз ψ неизвестен и его можно лишь приближенно определить по заданному углу сдвиг фаз φ между током и напряжением у зажимов.

При помощи вспомогательного построения можно в полярной диаграмме легко освободиться от $\angle \psi$. Из фиг. 205 видно, что, удлиняя вектор E_g на величину E_g^0 , мы охватываем $\angle \psi$.

Удлиняя отрезок до пересечения в точке C с направлением ЭДС холостого хода, мы получим:

$$AC \sim E_g^0 = \frac{E_g}{\cos \psi} \dots \dots \dots (573)$$

При прямолинейной характеристике в воздушном зазоре величине E_g^0 соответствует возбуждение

$$MN \sim k_g \cdot \frac{\theta_g}{\cos \psi} = k_g \cdot \theta_A \dots \dots \dots (574)$$

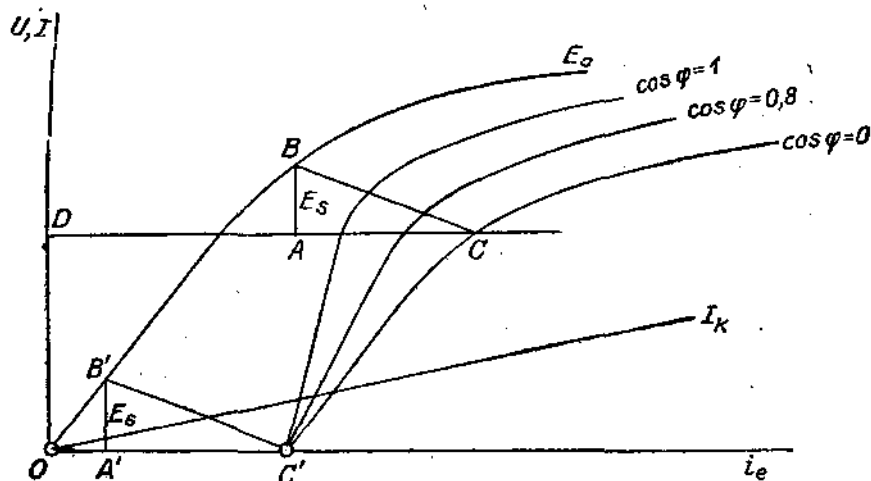
При заданных напряжении сети U , токе нагрузки I и угле сдвига фаз φ можно весьма просто построить полярную диаграмму. По машинным постоянным и по силе тока I определяют оба вектора E_r и E_s по величине и фазе и пристраивают их к напряжению U . Из условий замкнутости многоугольника векторов напряжений для замкнутой цепи получается индуцированная ЭДС по величине и направлению. При помощи приведенных ампер-витков якоря находят затем из характеристики воздушного зазора величину E_g^0 и наносят ее в виде продолжения величины E_g . Конечная точка C определяет направление OC продольной ЭДС E_r . Поперечная ЭДС E_s ($\overline{AB}$) перпендикулярна к этому направлению. Тогда $\overline{OB}$ представляет собою величину E_r . Из характеристики холостого хода берут соответствующую величину результирующих ампер-витков MG . Прибавляя сюда (или вычитая отсюда) приведенные продольные ампер-витки якоря $k_i \cdot \theta_i = k_i \cdot \theta_A \sin \psi$ (для этого может быть взят $\angle \psi$ из полярной диаграммы), мы получим, наконец, ампер-витки, необходимые для рассматриваемого случая.

Для величины главного потока мерой являются результирующие ампер-витки полюсов. Поток рассеяния полюсов создается все же не полными ампер-витками, так как продольные ампер-витки якоря не действуют по пути рассеяния между полюсами, не сопряженном с токами якоря. Благодаря этому соотношения потока рассеяния к главному потоку при нагрузке меняются в сравнении с холостым ходом. Так как поток рассеяния пронизывает также полюсный сердечник и ярмо, то при нагрузке насыщение в этих частях будет другое, чем при холостом ходе для той же индуцированной ЭДС. При больших значениях продольной слагающей поля якоря ($\psi \approx 90^\circ$) и при сильном насыщении в полюсных сердечниках использование характеристики холостого хода из фиг. 205 может, следовательно, повести к неправильным результатам.

Для того, чтобы учесть также и влияние изменившегося рассеяния полюсов на величину потребного возбуждения, наносят три частичные характеристики согласно А, § 5 для частей магнитной цепи (фиг. 208). Сначала определяют ампер-витки OA , необходимые для создания потока Φ

Особое место среди нагрузочных характеристик занимает характеристика для $\cos \varphi = 0$ при перевозбуждении. Пренебрегая здесь незначительной слагающей омического падения напряжения, мы получим также $\cos \varphi = 0$ и $\sin \varphi = 1$.

Вектор индуцированной ЭДС противоположен по фазе вектору напряжения сети (фиг. 210). Вектор ЭДС рассеяния E_s отстает от тока I



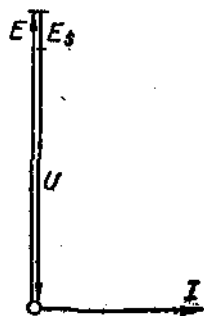
Фиг. 209. Нагрузочные характеристики.

на 90° и, следовательно, также противоположен по фазе ЭДС E . По своей величине потребная результирующая ЭДС E , таким образом, равна алгебраической сумме из напряжения сети U и ЭДС рассеяния E_s .

На фиг. 209 проведена линия, параллельная к оси абсцисс, на расстоянии $OD \sim U$. Прибавляя величину $AB \sim E_s$, мы получаем величину результирующей ЭДС E . Возбуждение для рассматриваемого случая нагрузки получается от сложения возбуждения холостого хода DA результирующей ЭДС E с возбуждением $AC \sim k_f \cdot \theta_A$ (так как $\sin \varphi = 1$), необходимым для компенсации противодействующего поля. Поперечная составляющая поля не создается ампер-витками якоря ($\cos \varphi = 0$). Соединяя точки A , B и C прямыми линиями, мы получаем так называемый треугольник Потье¹⁾.

Так как напряжение рассеяния E_s и противодействующее поле якоря зависят лишь от тока I , а не от напряжения U , то величина треугольника Потье для постоянной силы тока (для которой строится каждая нагрузочная характеристика) будет всегда одинакова. При помощи треугольника Потье можно для каждого напряжения сети легко определить соответствующую точку нагрузочной характеристики при $\cos \varphi = 0$.

При таком построении нагрузочной характеристики ($\cos \varphi = 0$) допускается ошибка постольку, поскольку здесь пренебрегали влиянием рассеяния полюсов (см. выше), увеличившегося из-за увеличения возбуждения с целью ослабления противодействующего поля. При сильных насыщениях в сердечниках полюсов это влияние может оказаться весьма



Фиг. 210. Векторная диаграмма для $\cos \varphi = 0$ (перевозбуждение).

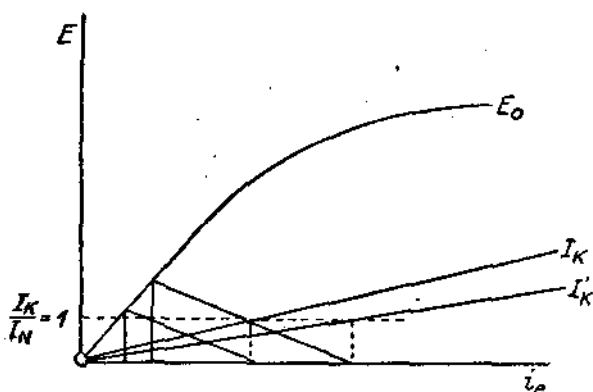
¹⁾ А. Potier. Sur la réaction d'induit des alternateurs. L'Eclairage Electrique XXIV. 133. 1900.

значительным, что вызовет сильное отклонение вправо нагрузочной характеристики при $\cos \varphi = 0$, в особенности при высоких напряжениях¹⁾.

При коротком замыкании на зажимах (если пренебречь омическим падением напряжения) $\cos \varphi$ также будет равен нулю. Потребное возбуждение и здесь, следовательно, может быть определено при помощи треугольника Потье ($\triangle A'B'C'$ на фиг. 209). Возбуждение, необходимое для компенсации противодействующего поля якоря, можно подсчитать весьма точно по ур. (565). Поэтому при помощи треугольника Потье можно из опыта короткого замыкания определить величину напряжения рассеяния E_s , а тем самым, после измерения тока короткого замыкания, также и реакцию рассеяния.

Нанося ток короткого замыкания I_k в функции от возбуждения (фиг. 211), мы получим характеристику короткого замыкания, которая, при встречающихся на практике возбуждениях, представляет

собой прямую линию (соответственно прямолинейной части характеристики холостого хода). Из характеристики короткого замыкания можно сделать существенные заключения о свойствах синхронной машины. Было уже доказано, что, при известных допущениях, момент вращения пропорционален току короткого замыкания при выбранном возбуждении [ур. (555)]. Если для какого-либо возбуждения, соответствующего определенным условиям работы, желателен высокий опрокидывающий момент, то машину следует про-



Фиг. 211. Характеристика холостого хода и короткого замыкания.

ектировать с таким расчетом, чтобы ток короткого замыкания при этом возбуждении был велик. Пусть, например, ток короткого замыкания синхронного двигателя при номинальном возбуждении составляет 1,6-кратную величину от номинальной силы тока. При таком возбуждении опрокидывающий момент будет приблизительно на 60% больше, чем номинальный момент вращения²⁾.

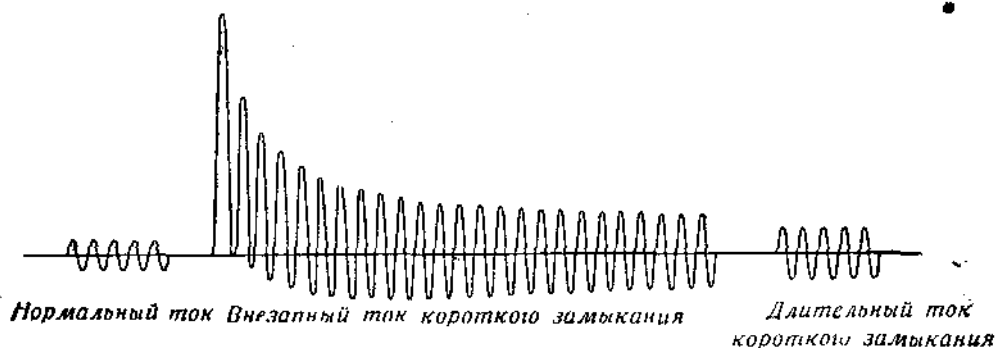
Отношение тока короткого замыкания I_k к номинальному току I_N будет тем меньше, чем больше треугольник Потье для номинального тока (фиг. 211). Оба катета этого треугольника пропорциональны ампер-виткам якоря, следовательно, при заданном внутреннем диаметре якоря D_i и объему тока A ур. (548). При данном использовании машины (ур. 206: $C \sim A \cdot B_i$), для слабо возбужденного синхронного двигателя ($\cos \varphi = 1$), подверженного частым толчкам нагрузки, следует поэтому выбрать небольшой объем тока A и соответствующую высокую индукцию для того, чтобы достигнуть большого тока короткого замыкания, а тем самым и повышенную устойчивость в работе. Эти данные хорошо согласуются также и с соображениями, изложенными выше.

В современных синхронных машинах ток короткого замыкания при номинальном возбуждении колеблется между 1,5- и 3-кратным значением номинального тока.

¹⁾ A. Mandl, см. выше.

²⁾ E. Siegel. Kippleistung und Stromdiagramm der Synchronmaschine. Elektrotechnik und Maschinenbau 1927, 1.

Если внезапно замкнуть накоротко зажимы работающей синхронной машины, то возникнут токи порядка $10-20$ -кратного номинальному току, затухающие до величины длительного тока короткого замыкания лишь через несколько секунд (фиг. 212). Здесь речь идет о так называемых нестационарных процессах, сопровождающих каждый процесс включения и выключения, каждое изменение нагрузки или вообще каждый переход тока из одного стационарного состояния в другое. Каждому стационарному состоянию тока соответствуют определенные количества энергии магнитного и электрического полей. Последние не могут внезапно изменяться и требуют поэтому некоторого времени, в продолжение которого на стационарный ток налагается так называемый уравнивающий ток, обуславливающий переход к новому состоянию¹⁾.



Фиг. 212. Осциллограмма короткого замыкания.

Оказалось, что толчок тока короткого замыкания в основном зависит от рассеяния статора машины и от напряжения, при котором происходит короткое замыкание. Для возникновения поля от реакции якоря требуется несколько секунд, в продолжение которых толчок тока затухает до величины длительного тока короткого замыкания. Отношение максимально возможной амплитуды толчка тока короткого замыкания I_p к амплитуде номинального тока I_n может быть представлено уравнением²⁾:

$$\frac{I_p}{I_n} = 1,8 \frac{E}{E_s} \dots \dots \dots (175)$$

Здесь для величины E_s в машинах с явными полюсами и демпферной обмоткой, а также в машинах с неявными полюсами следует принять напряжение рассеяния, соответствующее пазовому и лобовому потокам рассеяния; в машинах с явными полюсами без демпферной обмотки может возникнуть еще и поток рассеяния в междуполосном пространстве, благодаря чему E_s несколько возрастает. Эту E_s можно определить опытным путем, питая для этого обмотку статора переменным током при вынутом роторе.

При построении генераторов раньше стремились к небольшим падениям напряжения при нагрузке и к малым рассеяниям. Это приводило к очень большим мгновенным токам короткого замыкания. Если например,

¹⁾ F. Punga. Der plötzliche Kurzschluss von Drehstromdynamos. ETZ. 1906, S. 827. — J. Biermanns. Der plötzliche einphasige Kurzschluss der Drehstrom-Synchronmaschine. Arch. f. Elektrotechnik 3.354. 1915 — F. Niehammer. Der plötzliche Kurzschlussstrom von mehrphasigen Synchronmaschinen. Elektrotechnik und Maschinenbau. 1916, S. 437. — A. Tränkel. Theorie der Wechselströme. Berlin, Springer, 1921. — R. Rüdtenberg. Elektrische, Schaltvorgänge, Springer, Berlin, 1923.

²⁾ R. Rüdtenberg, там же стр. 98.

напряжение рассеяния машины составляет 6% от номинального напряжения, то первая амплитуда мгновенного тока короткого замыкания в самом неблагоприятном случае будет, согласно ур. (575), приблизительно в 30 раз больше, чем амплитуда номинального тока. Механические и электрические воздействия таких сильных толчков тока на обмотки машины, на аппаратуру и на провода с возрастанием мощностей машин и сетей увеличиваются настолько, что оказывается необходимым ограничить эти толчки¹⁾.

Согласно норм Союза германских электротехников (V. D. E. REM. 1923. § 47), амплитуда мгновенного тока короткого замыкания в самом неблагоприятном случае не должна превосходить 15-кратного значения амплитуды номинального тока; это соответствует, согласно ур. (575), напряжению рассеяния по меньшей мере в 12% от номинального напряжения. Сообразно с этим современные генераторы выполняются все с большими рассеяниями. Это достигается выбором большей линейной нагрузки A ур. (548). Правда, при этом увеличиваются изменения напряжения при колебаниях нагрузки, однако, при современных быстродействующих регуляторах эти изменения могут быть уравновешены быстрым изменением возбуждения.

§ 6. Параллельная работа синхронных машин²⁾.

Генератор переменного тока, питающий один нагрузку или сеть, работает аналогично генератору постоянного тока. Коэффициент мощности ($\cos \varphi$) зависит от характера нагрузки. Полярные диаграммы показывают, что при одинаковом возбуждении и одинаковом токе нагрузки напряжение у зажимов меняется при различных коэффициентах мощности (фиг. 209). На фиг. 213 нанесена для некоторых коэффициентов мощностей величина напряжения у зажимов в функции от тока нагрузки при постоянном возбуждении.

Было уже упомянуто (стр. 170), что сдвигу фаз между током и ЭДС в машинах переменного тока соответствует в машинах постоянного тока сдвиг зоны коммутации относительно системы полюсов. Внешней характеристике (фиг. 88) генератора постоянного тока с дополнительными полюсами (щетки в нейтральной зоне) при постоянном возбуждении соответствует при генераторе переменного тока кривая для $\cos \varphi = 1$ (фиг. 213). Сравнение обеих кривых показывает, что процентное выражение падения напряжения при нагрузке у генератора переменного тока возрастает сильнее, чем у генератора постоянного тока. Это следует отнести в машинах переменного тока, главным образом, за счет падения напряжения от реакции рассеяния.

Если нагрузка частично или целиком состоит из индуктивных сопротивлений, то устанавливается меньший коэффициент мощности. Для поддержания напряжения генератор при этом должен быть перевозбужден. При постоянном возбуждении падение напряжения усиливается благодаря противодействующему полю якоря при нагрузке. При $\cos \varphi = 0$ падение

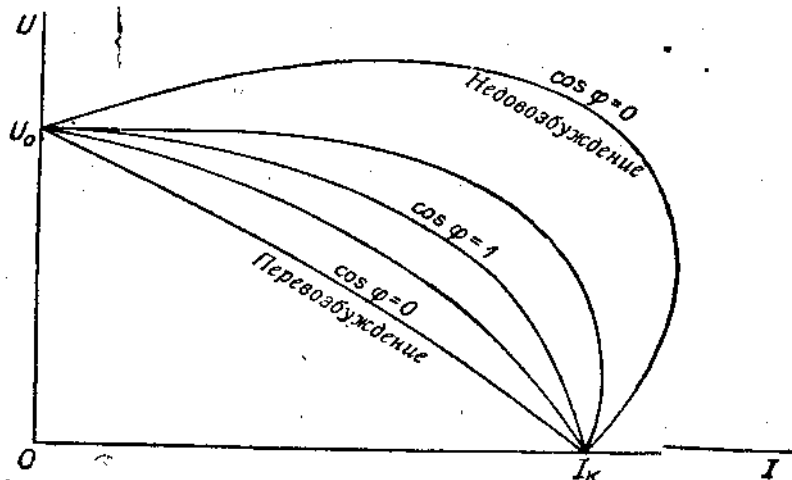
¹⁾ R. Rüdtenberg, Kurzschlussströme beim Betrieb grosser Kraftwerke, Elektrotechnik und Maschinenbau 5.77. 1925.

— То же самое. Springer, Berlin, 1925.

²⁾ G. Kapp, Das Pendeln parallel geschalteter Maschinen, Elektrot. Ztschr. 1899, S. 134. — J. Görges, Parallelbetrieb, Elektrot. Ztschr. 1900, S. 188 и 1902, S. 1053. — E. Rosenberg, Parallelbetrieb von Synchronmaschinen, Elektrot. Ztschr. 1902, S. 425 и 1903, S. 857. — J. Biermann, Ausgleichsvorgänge beim Parallelschalten von Synchronmaschinen, Archiv für Elektrotechnik 10. Heft 5,6 — F. Niehammer, Parallelbetrieb von Wechselstrommaschinen, Elektrotechnik und Maschinenbau 1918, S. 341... L. Fleischmann, Elektrot. Ztschr. 1906, S. 873. — Ders. Elektrotechnik und Maschinenbau 1908, S. 329.

напряжения будет наибольшим. Внешняя характеристика для этого случая будет почти прямой линией.

Если угол сдвига фаз определяется емкостным сопротивлением нагрузки, то генератор недовозбуждается. Главное поле при этом усиливается продольным полем якоря. Как показывает соответствующая внешняя характеристика, при нагрузке здесь в известных пределах будет иметь место повышение напряжения. При состоянии холостого хода ($U = U_0$; $I = 0$), а также и короткого замыкания ($U = 0$; $I = I_k$) все характеристики для различных коэффициентов мощностей при одинаковом возбуждении сходятся в одной точке, так как в этих обоих состояниях машина не зависит от внешней нагрузки. Ток нагрузки I_k при коротком замыкании у зажимов (ток короткого замыкания) зависит только от возбуждения и от внутренних сопротивлений машины; его величина может быть получена из характеристики короткого замыкания.



Фиг. 213. Внешняя характеристика генератора переменного тока при одиночной работе.

Изменение возбуждения вызывает соответствующее изменение напряжения у зажимов. Если нагрузка возрастает и мощность машины-двигателя оказывается больше недостаточной, то должно уменьшиться число оборотов. Благодаря этому приводится в действие регулятор машины-двигателя и последней подается большее наполнение, что ведет к повышению ее мощности до величины, соответствующей нагрузке. Не трудно убедиться в том, что мы имеем здесь дело с теми же процессами, что и при работе машины постоянного тока.

При совместной работе нескольких генераторов, в машинах переменного тока обнаруживаются некоторые отличия от машины постоянного тока. Одно только присоединение генератора к сети, питаемой другими генераторами, требует при машинах переменного тока выполнения большего числа условий, чем при машинах постоянного тока.

Для присоединения генератора постоянного тока к сети, находящейся под напряжением, достаточно возбудить этот генератор так, чтобы при заданном числе оборотов напряжение у зажимов (ЭДС холостого хода) было равно и противоположно напряжению сети. При включении не может тогда возникнуть никакого тока между машиной и сетью, так как отсутствует разность напряжений. Нагрузка генератора постоянного тока осуществляется тем, что его возбуждение усиливается.

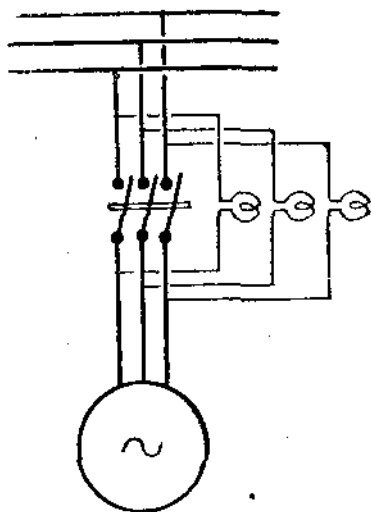
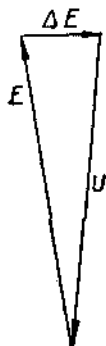
При этом возрастает ЭДС машины, так что возникает разница между ЭДС и напряжением сети. Состояние равновесия устанавливается (ур. 165) благодаря тому, что генератор питает сеть током, создающим в обмотке генератора омическое падение напряжения, равное вышеуказанной разнице. Если мощность машины-двигателя недостаточна для этой нагрузки, то число оборотов падает, как при одиночной работе, регулятор начинает действовать и мощность двигателя возрастает до необходимой величины.

Для того чтобы нагрузка сети переменного тока могла быть распределена по нескольким генераторам, необходимо, чтобы эти генераторы создавали переменные ЭДС одного и того же числа периодов. Синхронные генераторы переменного тока, работающие на общую сеть, должны, следовательно, синхронно приводиться в движение. Как ниже будет

указано, синхронные генераторы обладают свойством при параллельной работе поддерживать друг у друга одинаковое вращение (синхронизирующая сила); в противном случае питание сети переменного тока при помощи нескольких синхронных генераторов было бы невозможно, так как при малейших колебаниях нагрузки или привода машины выпадали бы из синхронизма.

Для включения синхронного генератора в сеть переменного тока, уже питаемую другими генераторами, необходимо довести его сначала до синхронного числа оборотов. Для этого, как и в машине постоянного тока, необходимо установить возбуждение так, чтобы напряжение у зажимов генератора было равно и противоположно напряжению сети.

Фиг. 214. Результирующее напряжение при включении на неправильное положение полюса.



Фиг. 215. Фазовые лампы.

Если вектор напряжения машины по абсолютной величине равен вектору напряжения сети, однако повернут относительно последнего не в точности на 180° , то геометрическая сумма обоих векторов не будет равна нулю (фиг. 214). В момент включения в замкнутой цепи (сеть-обмотка генератора) будет действовать результирующее напряжение ΔE , вызывающее толчок тока. Этот толчок тока будет тем больше, чем больше результирующее напряжение в цепи в момент включения; последнее в самом неблагоприятном случае может быть равно алгебраической сумме из напряжений генератора и сети. Для избежания неправильных включений синхронных машин на параллельную работу придуманы различные синхронизирующие приспособления, позволяющие определить наиболее благоприятный момент для включения. Наиболее простым синхронизирующим приспособлением является фазовая лампа (фиг. 215). Параллельно рубильнику в каждой фазе между генератором и сетью включена лампа накаливания (фазовая лампа). Лампы загораются, когда возрастает результирующее напряжение между генератором и сетью в соответствующей фазе. Если машина достигла напряжения сети (определяется вольтметром), но все же не работает в полной мере синхронно с последней, то волны напряжения сети и генератора имеют различное

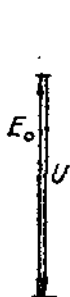
число периодов. От сложения этих двух волн получается волна интерференции, амплитуда которой претерпевает периодические изменения. Как известно, число этих изменений в секунду равно разности чисел периодов обеих волн напряжения. Соответственно изменениям интерференционной волны периодически зажигаются фазовые лампы. Если загорание и потухание фазовых ламп следуют друг за другом достаточно медленно, то машина при этом работает почти синхронно с сетью. Рубильник может быть включен в момент потухания ламп, так как геометрическая сумма напряжений сети и генератора равна нулю. Если фазовые лампы загораются не одновременно, а одна за другой, то из этого можно заключить, что следование фаз в генераторе и в сети неодинаково. В этом случае или меняют направление вращения генератора, или же обменивают местами два подводящих провода у зажимов генератора.

В принципе синхронные двигатели должны также синхронизироваться перед включением в сеть. В мотор-генераторах, служащих для преобразования переменного тока в постоянный, пользуются для пуска и синхронизации машиной постоянного тока, если имеется соответствующая сеть постоянного тока. Очень часто синхронные двигатели снабжаются особыми пусковыми двигателями (двигатели постоянного тока или асинхронные), сидящими на одном валу с синхронным двигателем и большей частью отключаемыми от последних тотчас же по окончании пуска. Наконец, синхронные двигатели пускаются в ход также и асинхронно; при этом для создания момента вращения при пуске используют, согласно Ютэну и Леблану (Huttn, Leblanc), устроенную в полюсах дэмпирующую обмотку в качестве коротко-замкнутого беличьего колеса асинхронной машины. Двигатель здесь присоединяется сначала лишь к части своего номинального напряжения (через автотрансформатор или ответвления от главного трансформатора) для того, чтобы толчок тока (ток короткого замыкания) при включении не был слишком велик; лишь после некоторого времени синхронной работы синхронный двигатель включается на полное напряжение. Так как во время синхронного бега поле якоря движется относительно обмоток полюсов, то в последних, особенно в начале пускового процесса, будет индуцироваться высокое напряжение.

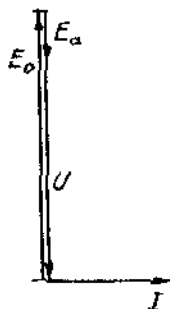
Для того чтобы при этом избежать опасных пробоев или перекрытий, обмотка полюсов должна замыкаться накоротко (замыкание часто осуществляется через возбуждательную машину). Момент, который может быть развит синхронным двигателем при асинхронном пуске, не велик (приблизительно до 30% от номинального момента); поэтому часто бывает необходимо пускать синхронный двигатель вхолостую и нагружать его лишь после достижения синхронизма.

Если синхронная машина синхронизирована и присоединена к сети при холостом ходе, то при правильном возбуждении ЭДС холостого хода и напряжение сети будут взаимно уравниваться (фиг. 216). В этом случае между машиной и сетью ток отсутствует. При возрастании возбуждения увеличивается ЭДС холостого хода, но, как вектор, она сохраняет первоначальное направление. Для восстановления состояния равновесия в цепи (сумма ЭДС должна быть равна нулю) через обмотку машины должен пройти ток, индуцирующий потребную ЭДС E_a в этой обмотке (омическим падением напряжения здесь пренебрегаем). Величина и направление E_a определяется из векторной диаграммы (фиг. 217). Так как ЭДС E_a отстает от индуцирующего ее тока на 90° , то этим определяется и направление I . Ток машины I при перевозбуждении во время холостого хода опережает на 90° напряжение сети, следовательно, отстает от ЭДС холостого хода E_0 на 90° (сравн. также B , § 5); таким образом, этот ток

представляет собою чистый реактивный ток. Отсюда ясно, что изменением возбуждения синхронной машины нельзя достигнуть изменения ее активной мощности; при этом изменяется только реактивный ток в машине. Было уже сказано (В, § 5), что, давая активную нагрузку синхронной машине, неизбежно получается отклонение ($\angle \theta$) полюса, или в полярной диаграмме — вектора E_0 , от положения холостого хода. Таким образом, для того, чтобы синхронный генератор, возбужденный при холостом ходе, согласно фиг. 216, и приключенный к сети, отдавал активную мощность, следует увеличить мощность машины двигателя (наполнение в паровых машинах, подведение движущей силы в турбинах). Благодаря этому ротор устанавливается ближе к своему положению при холостом ходе. Фиг. 218 показывает треугольник напряжений для такого рабочего состояния. Ток I , найденный по направлению и величине при помощи E_a , почти имеет направление вектора E_0 . Это означает электрическую отдачу мощности



Фиг. 216. Векторная диаграмма для холостого хода при „правильном возбуждении“.



Фиг. 217. Векторная диаграмма для холостого хода при „перевозбуждении“.



Фиг. 218. Векторная диаграмма при нагрузке.

генератором. Согласно В § 5, $\angle \theta$ является мерой для этой отдачи мощности. В пределах устойчивой работы мощность привода равна отдаваемой электрической мощности (если пренебречь внутренними потерями). Усилие привода, стремящееся увеличить $\angle \theta$, противодействует пондеромоторному усилию от токов в статоре генератора, так что при заданной мощности привода $\angle \theta$ остается постоянным. Если по какой-либо причине при данной мощности привода $\angle \theta$ увеличился, то при этом возрастет электрическая мощность; последняя становится, следовательно, больше механической подведенной мощности привода; машина при этом затормаживается, вектор ЭДС сдвигается несколько в сторону отставания до установления $\angle \theta$, соответствующего мощности привода, так что механическая и электрическая мощности снова окажутся в равновесии. Наоборот, при уменьшении $\angle \theta$ берет верх мощность привода и приводит ротор машины, а тем самым и вектор ЭДС, в синхронное положение. Таким образом, при каждом отклонении ротора от синхронного положения, заданного мощностью привода, возникает усилие, приводящее ротор снова в синхронное положение, так что при постоянной мощности привода сохраняется постоянство $\angle \theta$. Эта сила называется синхронизирующей силой, а соответствующий момент — синхронизирующим моментом, так как только благодаря последнему вообще мыслима синхронная работа. Количественно синхронизирующий момент равен разности пондеромоторных моментов вращения при заданном и при синхронном положениях ротора.

При внезапном удалении усилия привода в первый момент сохраняется еще угол отклонения θ , а следовательно, и ток I , создающий соответствующий момент вращения. Последний однако не встречает противодействующего момента в виде момента от машины двигателя, а потому в качестве синхронизирующего момента устанавливает полюс в положение холостого хода. Благодаря ускорению, получаемому при этом ротором, последний из-за инерции его частей перейдет по другую сторону от положения холостого хода; в этом новом положении синхронизирующий момент начинает снова возрастать с увеличением угла отклонения, но все же направлен против движения. Здесь происходит такой же процесс, как в физическом маятнике: синхронизирующей силе там соответствует сила тяжести, а положению холостого хода — положение покоя маятника. Такой колебательный процесс (собственные колебания) наступает при каждом изменении нагрузки, при чем за положение покоя, около которого колеблется ротор, следует принимать каждое синхронное положение ротора, устанавливающееся после изменения нагрузки. Если бы отсутствовали силы, способствующие затуханию колебания, то магнитная система, раз приведенная из-за изменения нагрузки или по какой-либо другой причине в состояние колебания, не прекратит этих колебаний. Собственные колебания демпфируются трением о воздух и в подшипниках омическими потерями, возникающими при прохождении уравнительного тока в обмотках статора благодаря колебаниям, и, наконец, в особенности потерями от вихревых токов в полюсных башмаках; так как при колебании полюса движется относительно синхронно вращающегося поля якоря, то в полюсных башмаках создаются вихревые токи; последние могут быть усилены, если полюса снабдить демпфирующей обмоткой Леблана (Leblanc). По закону Ленца, токи, созданные благодаря какому-либо движению, в пондеромоторном отношении действуют на последнее задерживающим образом. Следовательно, из-за вихревых токов в полюсных башмаках и в демпфирующей обмотке всякое собственное колебание очень быстро потухает. Поэтому в синхронных машинах, предназначенных для эксплуатации при сильно колеблющейся нагрузке, предусматривают демпфирующую обмотку (в синхронных двигателях всегда имеется такая обмотка).

На ряду с этими собственными колебаниями, возникающими при каждом изменении нагрузки и относительно быстро потухающими, в машине могут быть вызваны колебания от машины-двигателя или от сети. Как известно, поршневые машины (паровые, дизельные газовые) не обладают постоянным моментом вращения. Как это видно из диаграммы касательных усилий такой машины, приводной момент вращения за время одного оборота периодически колеблется около некоторого среднего значения. До тех пор, пока приводной момент больше своего среднего значения, вращающиеся массы приводимой в движение системы (машины, маховое колесо) получают ускорение, в остальное время наблюдается замедление. Скорость вращения поэтому также не постоянна, а колеблется между максимальным ($\omega_{\max}$) и минимальным ($\omega_{\min}$) значениями. За коэффициент неравномерности принимают отношение

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{\text{сред}}} \dots \dots \dots (576)$$

Если приводимая в движение машина является синхронным генератором, то колебание скорости вращения выразится в виде колебания величины индуктированной ЭДС; вектор ЭДС не будет поэтому вращаться с одинаковой угловой скоростью в полярной диаграмме. При питании генератором осветительной сети неравномерность значения ЭДС может

проявиться в виде колебания силы света. Коэффициент неравномерности не должен поэтому выходить из определенных пределов. Для осветительных установок коэффициент неравномерности не должен превосходить 1:250. При данном избытке момента вращения ускорение системы будет тем больше, чем меньше вращающиеся массы. Таким образом, увеличением вращающихся масс можно достигнуть любого уменьшения коэффициента неравномерности привода.

Если неравномерно вращаемый генератор работает на большую сеть, вектор напряжения которой вращается равномерно, то благодаря неравномерному вращению вектора ЭДС машины возникают сдвиги фаз между последним и вектором напряжения сети. При этом возникает синхронизирующая сила, увеличивающая амплитуду вынужденного колебания. Это увеличение тем значительнее, чем ближе число периодов вынужденного колебания к собственному колебанию. В случае совпадения чисел периодов (резонанс) это увеличение, если пренебречь демпфированием, должно было бы, согласно теории колебаний, стать бесконечно большим. Машина при этом должна выпасть из синхронизма. Благодаря наличию демпфирования это увеличение в каждом отдельном случае несколько ослабляется. Все же амплитуды колебаний вектора ЭДС машины относительно вектора напряжения сети вблизи резонанса весьма значительны. Благодаря этим колебаниям, называемым качанием машины, в случае не очень больших качаний возникают сильные периодические колебания в отдаче мощности машины, что ведет к выпадению последней из синхронизма.

Машина может быть в известных пределах так рассчитана, что достигается любое число собственных колебаний. Число собственных колебаний или их обратную величину—длительность периода собственного колебания—можно подсчитать по соответствующей формуле для вращающегося маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{D}}, \dots \dots \dots (577)$$

где I —момент инерции колеблющейся системы и D —направляющая сила, т.е. приращение момента вращения dM_d в зависимости от угла отклонения $d\vartheta$.

В технике момент инерции выражается большей частью через маховой момент (GD^2).

$$I = \frac{G_d D^2}{4 \cdot g} = \frac{G_d D^2}{4 \cdot 9,81} \dots \dots \dots (578)$$

Момент вращения маятника M_d , устанавливающий последний в нулевое положение, соответствует в синхронной машине синхронизирующему моменту M_s . Этот момент, как было выше указано, равен разности двух пондеромоторных моментов вращения, в которой вычитаемое постоянно. Изменение синхронизирующего момента в зависимости от ϑ может быть приравнено изменению пондеромоторного момента вращения при данном положении ротора в зависимости от этого угла.

Пондеромоторный момент вращения M_d , соответствующий заданному углу отклонения ротора ϑ (положению ротора), называется синхронным моментом вращения. Величину M_d в килограмметрах определяют из синхронной электрической активной мощности N_e в ваттах из уравнения:

$$M_d = \frac{N_e}{9,81 \Omega} = \frac{N_e}{9,81 \cdot \frac{2\pi \cdot n}{60}} = 0,975 \frac{N_e}{n} \text{ кгм}, \dots \dots \dots (579)$$

где Ω —механическая угловая скорость. Электрическую активную мощность можно при известных допущениях представить в функции от угла отклонения ϑ (ур. 555).

Таким образом, синхронный момент вращения равен

$$M_d = 0,975 \cdot \frac{\sqrt{3} U \cdot I_k \cdot \sin \vartheta}{n} = 0,975 \frac{N_k \cdot \sin \vartheta}{n} \quad (580)$$

где N_k — так называемая мощность короткого замыкания. Так как здесь речь идет о механических колебаниях, то вместо электрического $\angle \vartheta$ следует ввести механический $\angle \theta$. При p парах полюсов последний равен

$$\angle \theta = \angle \vartheta \frac{p}{2} \quad (581)$$

Таким образом, ур. (580) примет вид:

$$M_d = 0,975 \frac{N_k}{n} \cdot \sin p\theta \quad (582)$$

Изменение синхронного момента вращения в зависимости от $\angle \theta$, которое, согласно вышесказанного, может быть приравнено изменению синхронизирующего момента и, следовательно, представляет собою направляющую силу колеблющейся системы, выразится:

$$\frac{dM_d}{d\theta} = \frac{dM_s}{d\theta} = 0,975 \frac{N_k}{n} \cdot p \cdot \cos p\theta = 0,975 \frac{N_k}{n} \cdot p \cdot \cos \vartheta = D \quad (583)$$

При незначительных углах отклонения ϑ , практически для большой области устойчивой работы, можно принять $\cos \vartheta \approx 1$. Таким образом направляющая сила равна

$$D = 0,975 \frac{N_k}{n} \cdot p \quad (584)$$

Можно определить также длительность собственных колебаний системы из ур. (577):

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{G_s D^2 / n}{4 \cdot g \cdot 0,975 \cdot N_k \cdot p}} = 1,015 \sqrt{\frac{G_s D^2 \cdot n}{N_k \cdot p}} \quad (585)$$

Обратная величина будет представлять собою число периодов собственных колебаний.

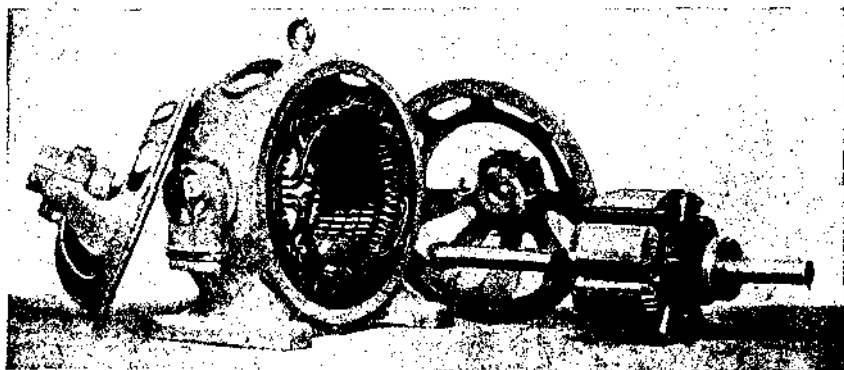
Выбором достаточно большого махового момента для ротора машины (при известных обстоятельствах предусматривают боковые или добавочные маховые колеса) можно добиться того, чтобы число собственных колебаний машины было значительно меньше основного числа периодов, а следовательно, и чисел периодов всех высших гармонических составляющих колебания, вызванного машиной-двигателем. Если это ведет к слишком большому маховому моменту, то для генератора выбирают число собственных колебаний, расположенное между основным колебанием и второй гармоникой в диаграмме касательных усилий. Как это видно из ур. (585), на число собственных колебаний можно подействовать выбором мощности короткого замыкания. Было уже сказано (В, § 5), что мерой для величины мощности короткого замыкания является отношение $\frac{\theta}{\theta_A}$ ампер-витков полюсов к ампер-виткам якоря. Чем больше это отношение, тем больше число собственных колебаний ротора синхронной машины при данной величине $G_s D^2$ и при данной нагрузке.

Не только в самих генераторах, неравномерно приводимых в движение, могут появиться качания, но также и в любом другом синхронном генераторе или двигателе, присоединенном к сети, поскольку один или несколько

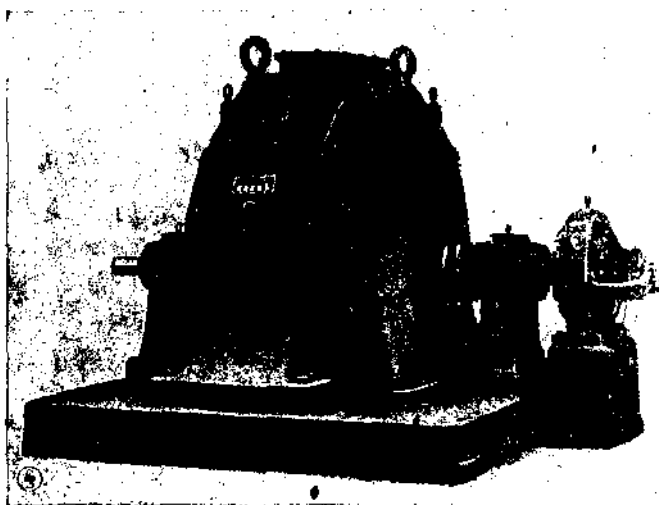
генераторов, питающих сеть, работают неравномерно; собственно говоря, для процесса колебаний безразлично, вызываются ли последние сетью, или машиной-двигателем. Необходимо поэтому следить за тем, чтобы ни в одной машине, присоединенной к сети, число собственных колебаний не было близко к вынужденным колебаниям в сети.

§ 7. Части конструкций ¹⁾.

Для малых мощностей синхронные машины большей частью выполняются с подшипниками в щитах (фиг. 219). В синхронных машинах большей мощности подшипники укрепляются на стойках (фиг. 220); последние



Фиг. 219. Синхронный генератор на 140 kVA, $\cos \varphi = 0,8$, 220 вольт, 750 об./мин.

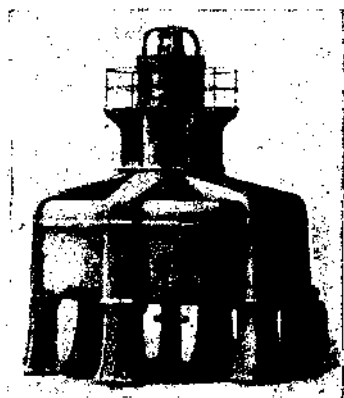


Фиг. 220. Трехфазная синхронная машина закрытого типа.

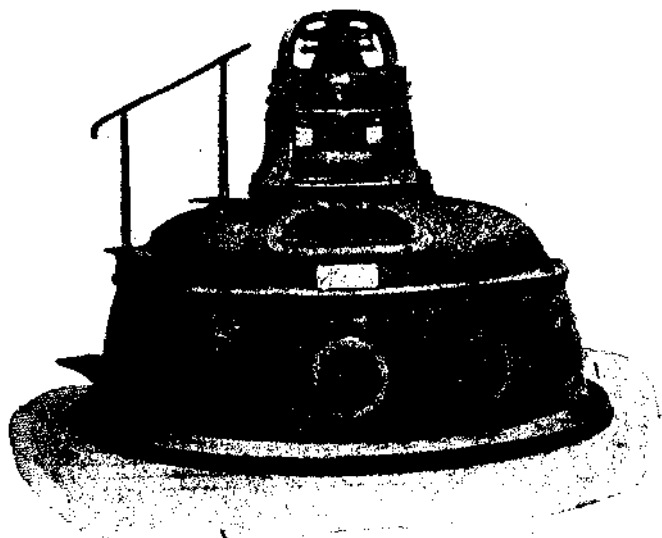
устанавливаются отдельно от остова машины и прикрепляются болтами к фундаментной плите. Особые конструкции требуются для синхронных генераторов переменного тока, предназначенных для работы от водяных турбин

¹⁾ R. Buchta. Generatoren für Wasserkraftanlagen. Siemens-Ztschr. 1922. Heft 5/6 — Siemens Schuckert, Wechselstrom. Turbogeneratoren. Selbstverlag.

с вертикальным валом. Остов генератора обычно прикрепляется здесь на круглой фундаментной плите или, для облегчения доступа к регулирующему механизму турбины, на нескольких стойках (фиг. 221). Суммарный вес роторов машины и турбины, а также и гидравлическое давление текущей воды, воспринимаются упорным подшипником, укрепляемым большей частью в верхней крестовине (фиг. 221) (при меньших машинах — в крышке остова, фиг. 222). Под упорным подшипником в верхней крестовине, а также в нижней крестовине устроены еще и направляющие подшипники, что можно увидеть из разреза генератора с вертикальным валом (фиг. 252).



Фиг. 221. Вертикальная машина на колонках.



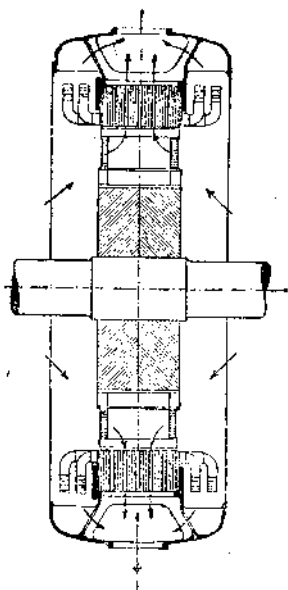
Фиг. 222. Синхронный генератор фирмы Сименс-Шуккерт на 265 kVA, $\cos \varphi = 0,8$, 230 вольт, 375 об/мин.

Вопрос вентиляции имеет большое значение и в синхронных машинах. Все синхронные машины малой, а также и средней мощности при небольших числах оборотов выполняются в виде открытой конструкции (фиг. 223). Здесь оказывается достаточной естественная вентиляция от вращения ротора. Воздух в междуполюсных пространствах под действием центробежной силы отбрасывается к радиальным каналам между пакетами железа статора и к головкам обмоток, благодаря чему охлаждаются обмотка и железо статора. Через отверстия в боковых частях машины нагретый воздух уходит в машинное помещение, которое должно также соответствующим образом вентилироваться для того, чтобы температура окружающей среды не стала слишком высокой.

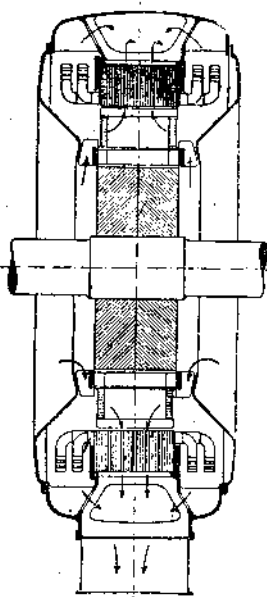
С возрастанием мощности увеличивается количество воздуха, потребное для охлаждения машины. С другой стороны, с возрастанием числа оборотов увеличивается активный объем железа, а тем самым и охлаждаемая поверхность. Соответственно этому должно возрасти количество охлаждающего воздуха. В быстроходных машинах средних мощностей и в тихоходных машинах большой мощности естественное самоохлаждение оказывается поэтому недостаточным. Эти машины изготавливаются поэтому защищенного типа и на их роторах предусматриваются вентиляторы (фиг. 224), проталкивающие воздух через охлаждающие пути в машине. Боковыми щитами, идущими в машине от остова почти вплотную до вентиляторов ротора, воздух направляется к охлаждающим путям. Нагретый

воздух отводится или в машинное помещение через боковые отверстия в остова машины, или же в наружную атмосферу через трубу в нижней части остова, а затем через вентиляционный канал.

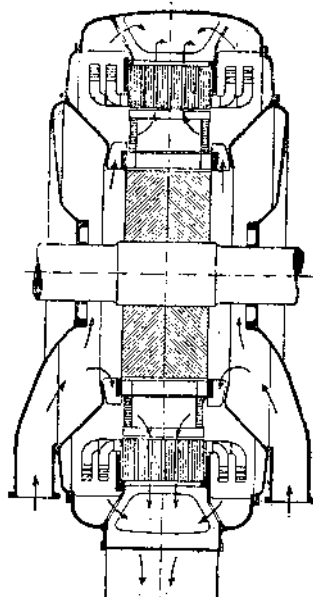
При мощных быстроходных машинах потребное количество воздуха возрастает настолько, что становится все затруднительнее получать его из машинного помещения, тем более что шум воздушного потока при этом становится нестерпимым. Такие машины выполняются совершенно закрытыми (фиг. 225).



Фиг. 223. Генератор открытого типа.



Фиг. 224. Генератор полу-закрытого типа.

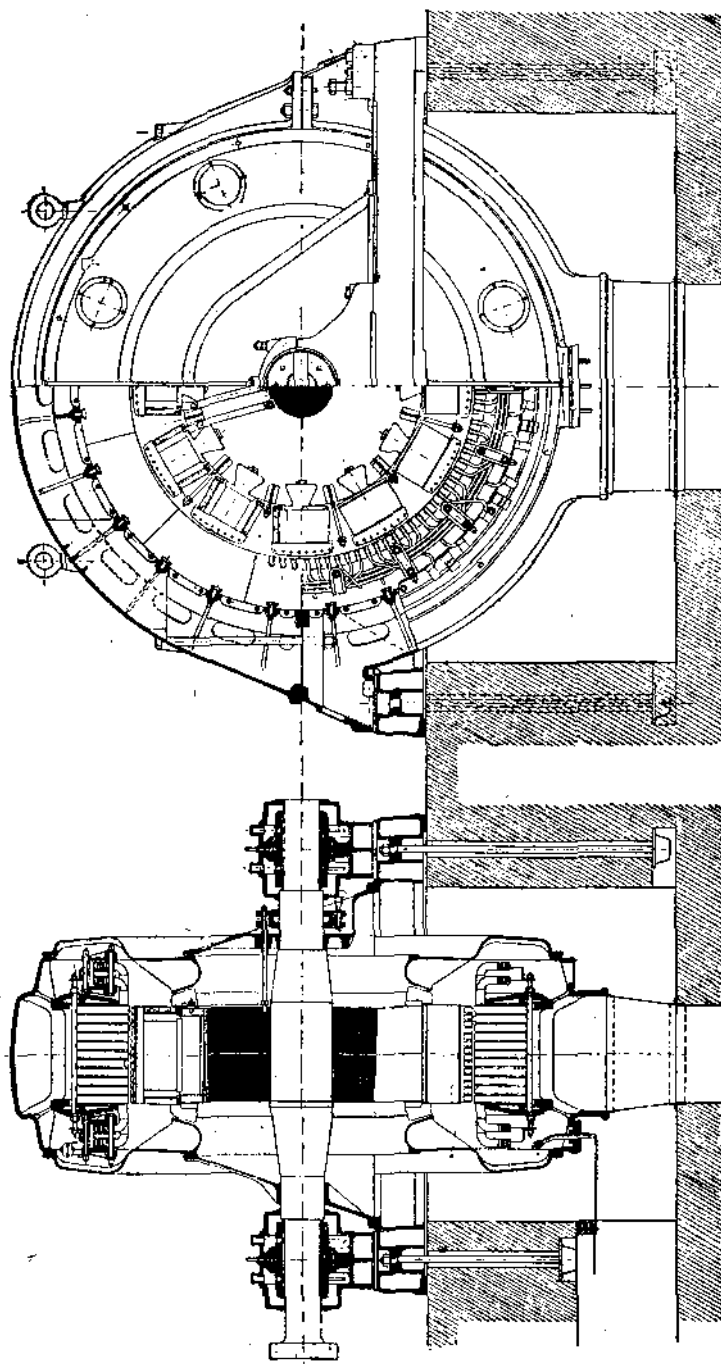


Фиг. 225. Генератор совершенно закрытого типа.

Здесь вся внутренняя часть машины совершенно отделена от машинного помещения. Охлаждающий воздух получается из машинных подвалов, связанных с наружной атмосферой (фиг. 226). При помощи вентилятора на роторе воздух проталкивается по охлаждаемым путям машины через вентиляционные каналы в наружную атмосферу. При тихоходных машинах большой мощности может случиться, что из-за незначительных окружных скоростей действия вентиляторов будет недостаточно для проталкивания через машину необходимых для охлаждения больших количеств воздуха, особенно при большом сопротивлении при трении воздуха в каналах (большая длина и малое поперечное сечение). В этом случае требуется устройство отдельного вентилятора (посторонняя вентиляция). Если воздух, подводимый к машине, недостаточно чист, то, во избежание загрязнения машины, его сначала пропускают через фильтр.

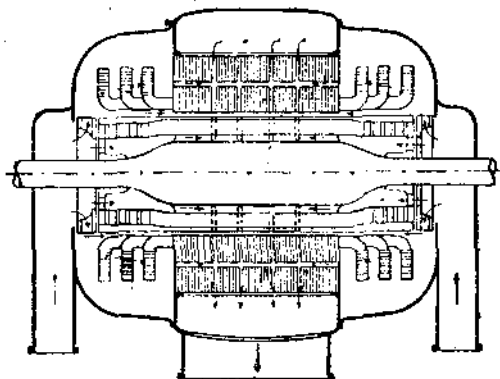
В машинах с вертикальным валом описанные конструкции применяются в соответствующих случаях. На фиг. 222 показан тип защищенной машины, а на фиг. 251 — тип совершенно закрытой машины.

Благодаря большим мощностям и высоким числам оборотов, а следовательно и большим количествам воздуха, турбогенераторы выполняются совершенно закрытыми (фиг. 227).



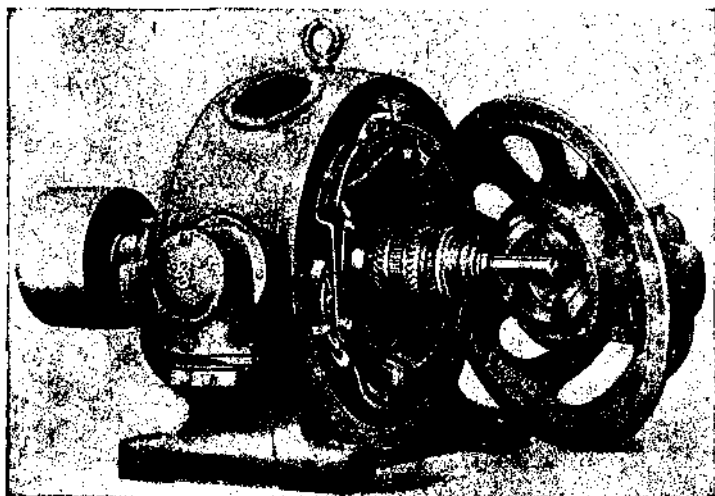
Фиг. 226. Разрез и боковой вид генератора закрытого типа.

Охлаждающий воздух частью насасывается осевыми каналами ротора и отбрасывается к железу статора через радиальные каналы, частью же засасывается двумя нагнетающими вентиляторами с обеих сторон машины и проталкивается через головки обмоток, а также через осевые и радиальные каналы железа статора. Нагретый воздух выбрасывается через отводящий канал.



Фиг. 227. Путь охлаждающего воздуха в статоре и роторе турбогенератора при двустороннем подведении воздуха.

Возбудительная машина в большинстве случаев устраивается на одном валу с главной машиной (если только речь не идет о машине с посторонним возбуждением). При малых машинах возбудитель помещается внутри подшипникового щита, при чем последний выполняется как магнитный остов возбудительной машины (фиг. 228). При более мощных машинах возбудитель насаживается вне главной машины на одном валу с ней (фиг. 220). При вертикальном вале возбудитель укрепляется над главной машиной (фиг. 221, 222 и 252). В качестве возбудительных машин чаще всего применяются шунтовые генераторы постоянного тока, рассчитанные на мощность возбуждения главной машины. Для того, чтобы иметь возможность в широких пределах получать устойчивую регулировку напряжения



Фиг. 228. Синхронная машина в 40 kVA с пристроенной к ней возбудительной машиной.

при помощи шунтовых регуляторов, возбудители выполняются с особыми полюсами (А, § 5). Для очень больших пределов регулировки (устойчивая регулировка до $i_e = 0$) применяются особые возбудительные машины, на которых мы, однако, останавливаться не будем¹⁾. Остов машины (боль-

¹⁾ Fr. Leyerer. Stabile Erregermaschinen für weiten Regelbereich. Siemens-Ztschr. Heft 4., S. 191.

шей частью чугунный), служащий как бы рамой для пакетов железа статора, выполняется в малых машинах сплошным, а в больших машинах — из двух или четырех частей. В больших машинах остов имеет ящикообразное поперечное сечение (фиг. 229), имеющее большой момент сопротивления и предохраняющее остов от изгиба. Образованное в таком сечении кольцевое пространство служит для собирания и отведения отработавшего воздуха (фиг. 223).

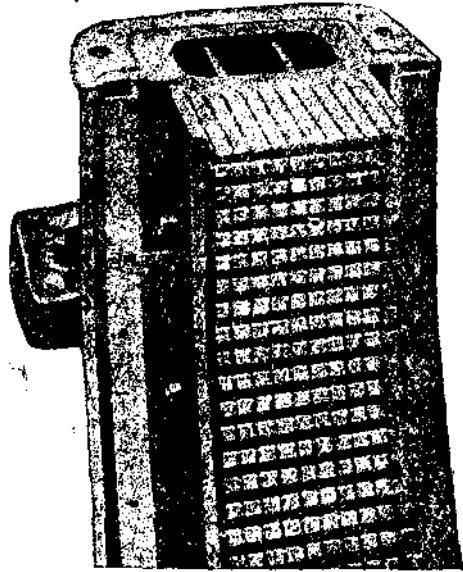
Железо якоря составляется из листов динамного железа толщиной в 0,5 мм, оклеенных с одной стороны бумагой. Если с точки зрения нагревания или потерь это необходимо, то применяют и высоколегированное железо. В малых машинах листы выполняются в виде колец, в больших машинах кольца состояются из сегментов. Стыки между последними не устраиваются в одной плоскости, а смещаются один относительно другого. Пазы, служащие для удержания обмотки, штампуются в листах, так же как и отверстия в турбогенераторе, образующие осевые охлаждающие каналы в статоре (фиг. 230). |

Для увеличения охлаждающих поверхностей все кольцевое тело в длинных машинах делится на несколько пакетов, толщиной в 5—7 см, между которыми может проходить охлаждающий воздух (фиг. 229). Расстояние между пакетами (1 до 1,5 см) сохраняется при помощи промежуточных пластин, приклепанных или приваренных к конечным листам пакета. Все кольцевое тело, образуемое листами, запрессовывается между двумя крайними зажимными плитами при помощи изолированных болтов или заскакивающего кольца (фиг. 229). Часто одна из зажимных плит приливается к остову. Для того, чтобы предохранить пакеты от проворачивания под действием магнитных усилий, они удерживаются полюсами, имеющими форму ласточкина хвоста; последние прикрепляются к остову болтами (фиг. 226).

Наиболее употребительной формой паза является открытая форма, так как при ней проще всего выполняется укладка обмотки. Для ослабления пазовых гармоник применяют иногда и полузакрытые пазы (фиг. 175). При массивных полюсных башмаках выбирают для статора полузакрытые пазы для того, чтобы не возросли потери в поверхностях полюсных башмаков (А, § 9). Из тех же соображений принимают полузакрытые пазы и для турбогенераторов.

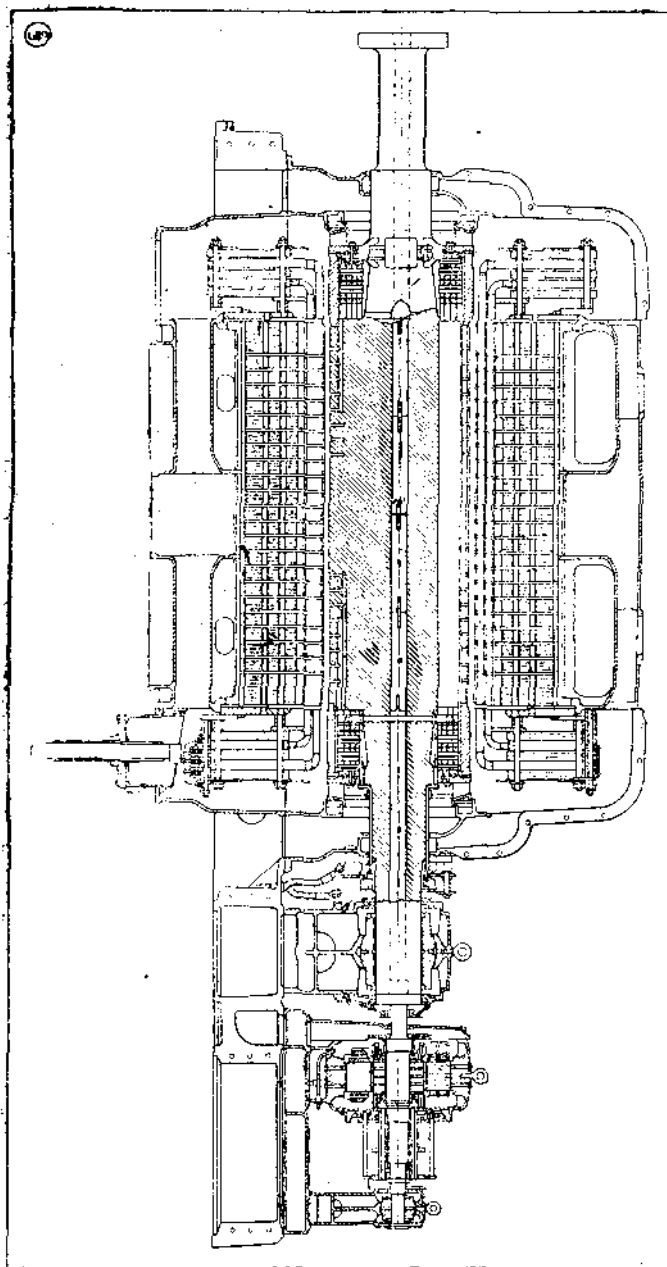
Обмотка статора выполняется, в зависимости от мощности, напряжения и числа оборотов, в виде катушечной или стержневой.

Было уже упомянуто (В, § 2), что катушка может быть составлена из частичных катушек двумя различными способами: витки катушки могут иметь одинаковую ширину или общую ось (фиг. 165 и 166). Обмотки из витков одинаковой ширины применяются главным образом



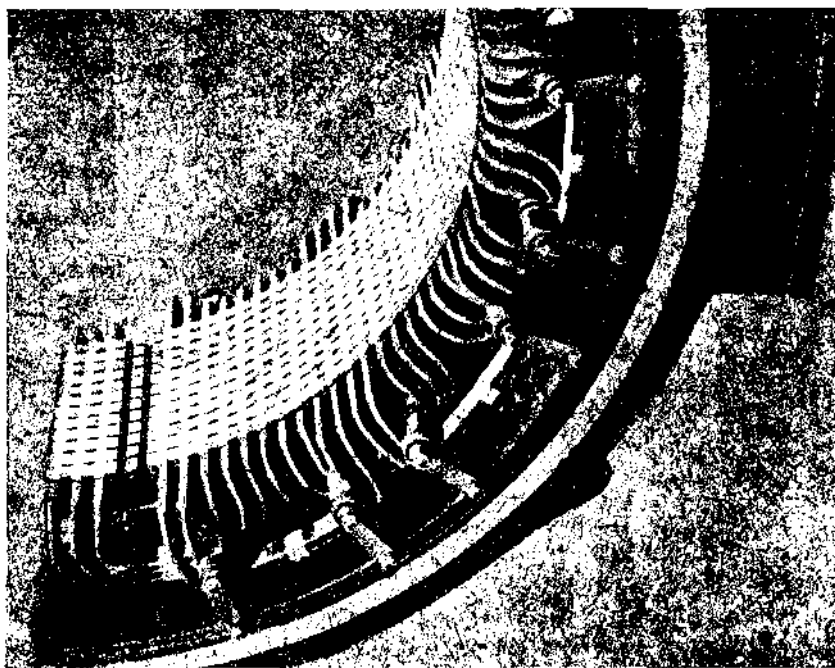
Фиг. 229. Вид части остова с пакетом железа до укладки обмотки.

при больших полюсных делениях и многих пазах на полюс и фазу (турбогенераторы). На фиг. 231 представлена такая катушечная обмотка при $2p = 4$ полюсам и $q = 4$ пазам на полюс и фазу; эта обмотка выполнена

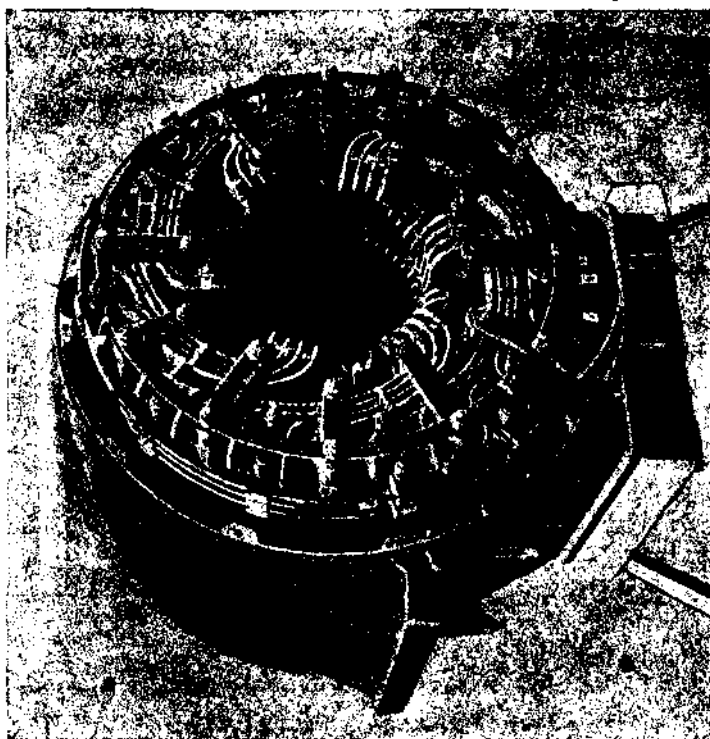


Фиг. 230. Продольный разрез по трехфазному турбогенератору в 32 000 кВА для 3 000 об./мин. с возбуждающей машиной.

однослойной. Здесь ясно видны $3p = 6$ катушек (В, § 2) с 4 частичными катушками в каждой. Наиболее распространенной обмоткой является обмотка с катушками, имеющими витки с общей осью (фиг. 166). На фиг. 232 показана часть такой обмотки статора. Это — обмотка с дробным

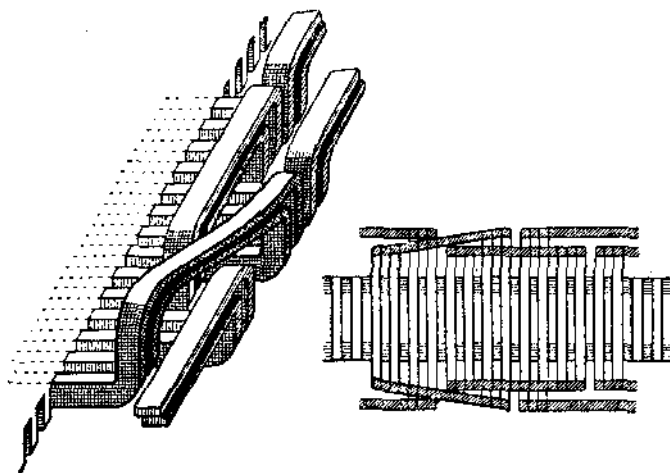


Фиг. 232. Шаблонная катушечная обмотка и ее укрепление.



Фиг. 231. Статор трехфазного турбогенератора с катушечной обмоткой.

числом пазов (см. В § 2), имеющая $q = 2,5$ пазов на полюс и фазу; здесь следуют одна за другой двукратные и однократные катушки. Схема такой обмотки изображена на фиг. 254. По числу плоскостей, в которых распо-



Фиг. 233. Двухэтажная обмотка с одной переходной катушкой.

лагаются обмоточные головки, обмотки делаются на двухэтажные (фиг. 232) и трехэтажные (фиг. 227). Последние выполняются редко. При нечетном числе пар полюсов p общее число катушек $3p$ будет также нечетным; таким образом, в двухэтажных обмотках головка одной катушки будет расположена в двух этажах (фиг. 233).

Такая катушка называется переходной (Schlupfspule).

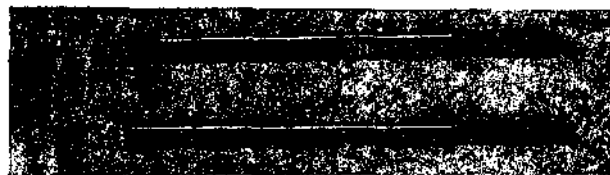
При открытых пазах катушки изготовляются на шаблонах в виде полных катушек (фиг. 234), а при полузаталкиваются через пазы с одной стороны машины, а концы проводов соединяются с другой стороны машины в одну катушечную головку.

Обмотки машин переменного тока изготавливаются также и для высоких напряжений. При напряжениях свыше 3000 вольт катушку в пределах паза окружают слюдой.

Внутри этой гильзы катушка асфальтируется под вакуумом при помощи особой массы, так как при наличии воздуха могут возникнуть вредные разряды через слюду. Слои проводов, если это необходимо, отделяются один от другого промежуточными прокладками. Особенно обильно изолируются входные катушки отдельных фаз, так как они чаще других катушек повреждаются от блуждающих волн сети.



Фиг. 234. Шаблонная катушка, готовая к укладке.



Фиг. 235. Катушка с одной головкой.

перечных сечениях — прессованный шнур. При выборе поперечных сечений проводов не следует забывать, что через последние проходит переменный ток и что, следовательно, пазовое поле рассеяния (фиг. 185)

будет переменным полем. Последнее создает в массивных медных проводах вихревые токи, налагающиеся на полезные токи и создающие таким образом неравномерное распределение плотности тока по поперечному сечению провода (ср. явление скинэффекта). Разделением поперечных сечений проводов плоскостью, перпендикулярной к потоку (следовательно, вглубь паза), можно достигнуть уменьшения вихревых токов (ср. разделение железа якоря на листы). Вихревые токи вызывают добавочные джоулевы потери. При неправильно выбранном поперечном сечении последние могут возрасти в такой мере, что джоулевы потери при питании обмотки переменным током окажутся во много раз больше, чем при питании постоянным током. А. В. Field¹⁾ первый считал добавочные джоулевы потери и указал путь к их ослаблению.

Для каждой обмотки из плоских проводов, при данной ширине провода, зависящей от ширины паза, можно найти такую высоту провода, при которой потери на переменные токи (сумма из потерь постоянного тока и добавочных потерь) при данной силе тока были бы наименьшими, при увеличении высоты провода приращение добавочных потерь в проводе будет больше, чем уменьшение омических потерь (постоянного тока). В этом случае увеличение поперечного сечения провода означало бы излишнее расходование материала. При уменьшении высоты провода возрастание омических потерь будет больше, чем уменьшение добавочных потерь. Высота провода, которой соответствуют наименьшие потери от переменных токов, называется критической высотой провода²⁾. Если в обмотке соблюдена критическая высота, то добавочные джоулевы потери в проводах составят лишь 33% от омических потерь.

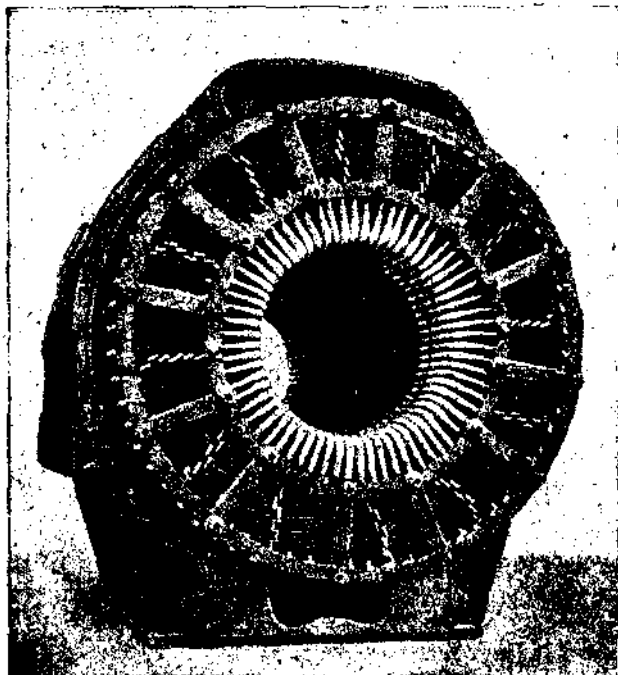
При больших поперечных сечениях проводов, даже и при соблюдении критической высоты последних, часто наблюдаются слишком большие потери, а следовательно, и сильное нагревание обмотки. В этом случае потери от переменных токов могут быть уменьшены подразделением толстого провода на несколько тонких параллельных проводов; при этом, правда, увеличивается общее сечение такого провода. Увеличение поперечного сечения способствует здесь уменьшению потерь от постоянного тока, а подразделение (по высоте) провода ослабляет добавочные джоулевы потери. Частичные провода должны быть изолированы друг от друга, так как в противном случае они, вместе взятые, будут в электрическом отношении работать как один провод. Так как отдельные частичные провода расположены в полях рассеяния разной силы (фиг. 185), то ЭДС, индуцированные этими полями в частичных проводах, будут различными в зависимости от положения последних в пазу. При этом в частичных проводах через запаянные концы обмоток потекут вредные уравнивающие токи; во избежание этого в соединениях между катушками или в головках катушек частичные провода перегруппировываются в различных пазах с таким расчетом, чтобы сумма ЭДС, индуцированных полями рассеяния в различных пазах, была бы одна и та же для каждого частичного провода³⁾.

Добавочные джоулевы потери возникают также из-за неравномерного распределения главного потока по пространству паза (фиг. 39). Такие потери ослабляются разделением провода по ширине паза. Полу-

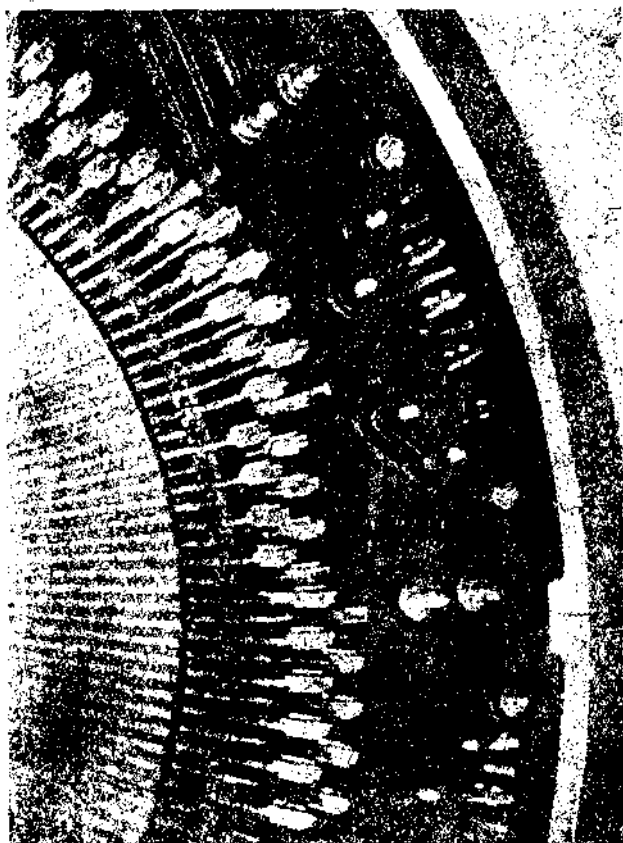
¹⁾ A. B. Field. Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers 1905., p. 659.

²⁾ W. Rogowski. Kritische Leiterhöhe. Archiv für Elektrotechnik. Z. 81, 1911. — R. Richter. Kritische Leiterhöhe. Archiv für Elektrotechnik Z. 518. 1914. — Berechnung der zusätzlichen Stromwärme. Archiv für Elektrotechnik 3. 175. 1915. — Zusätzliche Stromwärme in Nutenwicklungen. Archiv für Elektrotechnik 4. 1. 1915.

³⁾ F. Hillebrand. Stromwärme in unterteilten Leitern. Archiv für Elektrotechnik 3. 111. 1914. R. Richter. Stromwärme in unterteilten Leitern. Archiv für Elektrotechnik 5. 1. 1916.



Фиг. 237. Статор трехфазного турбогенератора фиг. 230 с готовой обмоткой.

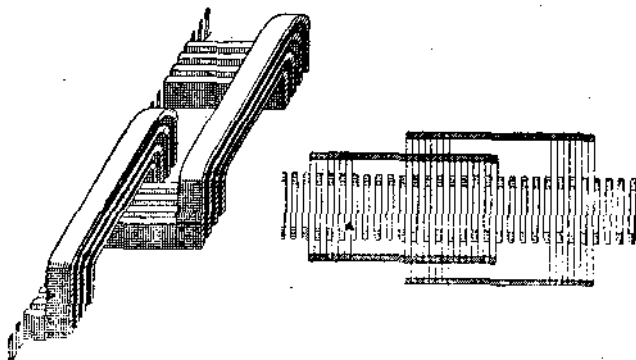


Фиг. 236. Стержневая обмотка и ее укрепление.

закрытый паз (фиг. 175) хорошо экранирует пространство паза от проникновения главного поля, а потому зачастую применяется для ослабления добавочных джоулевых потерь. В машинах переменного тока следует избегать высоких насыщений зубцов, так как благодаря этому часть главного поля проникает в пространство паза (А, § 5).

Деление больших поперечных сечений на частичные рекомендуется также из-за удобства изготовления обмотки, так как изгибание сплошных плоских проводов больших сечений (приблизительно, больше 30 мм²) представляет значительные трудности.

Стержневые обмотки могут быть выполнены однослойными (фиг. 236) и двуслойными (фиг. 237). Стержни соединяются между собой или в витки с общей осью при помощи дугообразных скоб (фиг. 238), или же в витки одинаковой ширины при помощи вилообразных скоб (фиг. 237). Чаще всего встречается последнее устройство. Скобы выполняются большей частью из сплошной плоской меди, так как они свободно расположены в воздухе и неравномерность в распределении поля рассеяния и образования в проводах вихревых токов здесь не так значительны, как в проводах, лежащих в пазу. Стержни в пазах в меньших машинах изготавливаются большей частью из медного троса, скрученного из многих проводов, зачастую покрываемых эмалью. Так как использование медным тросом пространства паза неудовлетворительное, то в больших машинах стержни делятся на прямоугольные плоские провода, укладываемые так, что каждый частичный провод делает в пазу один или несколько полных шагов винта. Этим достигается то, что каждый частичный провод занимает в пазу все возможные положения и в каждом из этих проводов будет индуцироваться одна и та же ЭДС рассеяния.

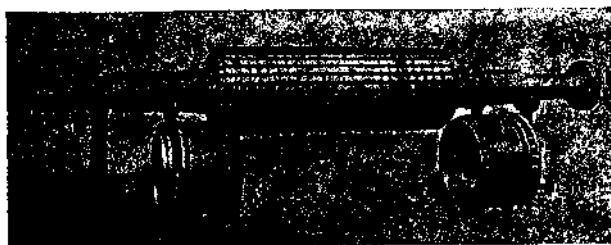


Фиг. 238. Стержневая обмотка с дугообразными лобовыми соединениями.

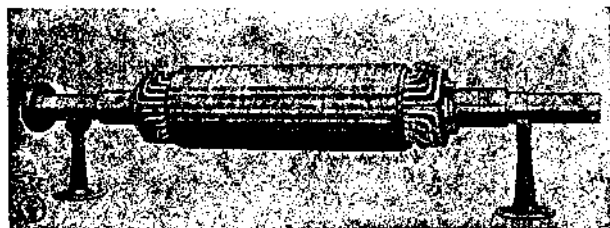
Необходимо следить за тем, чтобы головки обмоток не были расположены слишком близко к железу якоря или к щитам, так как в противном случае в этих массивных железных частях под действием полей рассеяния обмотки могут возникнуть вихревые токи, увеличивающие потери машины, а тем самым ухудшающие коэффициент полезного действия. Определенные расстояния между головкой обмотки и железом, в особенности в машинах высокого напряжения, следует еще соблюдать и для избежания пробоя между головкой и железом, так как головки обмоток окружены не слюдой, как прямолинейные части проводника в пазу, а только изоляционной лентой.

В больших сетях переменного тока всегда приходится считаться с возможностью возникновения коротких замыканий (В, § 5). Благодаря сильным токам, проходящим при коротком замыкании через обмотку машины, между отдельными головками обмоток, а также между головками и железом статора возникают механические усилия соответствующей величины. Для того, чтобы обмотки не деформировались или совершенно не

разрушались, необходимо прикреплять к железу и между собою головки при помощи болтов, промежуточных колодок и поперечных полос. На



Фиг. 239. Стальное тело ротора трехфазного турбогенератора из фиг. 230 с колпаками и вентиляторами.



Фиг. 240. Ротор в полуготовом виде.



Фиг. 241. Готовый ротор.



Фиг. 242. Тело ротора и полюса из штампованного железа.

снимках с обмоток видны эти скрепления. Особенно крепкими должны быть скрепления в машинах большой мощности и с большим полюсным делением (турбогенераторы).

По устройству ротора, на котором укреплены обмотки полюсов, синхронные машины подразделяются, как уже было указано (В, § 2), на машины с неявными и явными полюсами.

Роторам машин с неявными полюсами (турбомашины) из-за их больших окружных скоростей придается форма цилиндра, так что центробежные силы здесь распределяются равномерно. Цилиндрическое тело ротора, изготовленное из легированной стали высокого качества, в двухполюсных и четырехполюсных машинах с небольшим диаметром ротора выковывается вместе с валом из одного куска. В четырехполюсных машинах большего диаметра тело ротора составляется из стальных плит, укрепляемых на валу при помощи нажимного кольца.

Обмотка возбуждения расположена в пазах на окружности ротора (В, § 3). Необмотанная часть (фиг. 177 и 239) соответствует полюсному башмаку при явных полюсах, тогда как междуполюсное пространство получается по середине обмотанной части. Пазы протрагиваются в массиве ротора. По другим

конструкциям, в массиве ротора протрагиваются только пазы, имеющие форму ласточкина хвоста; в эти пазы запрессовываются пакеты зубцов, склепанные под давлением из стальных листов. Катушка полюса, состоящая,

благодаря распределению, из нескольких частичных катушек (5 на фиг. 240), наматывается из плоской меди так, что провода лежат один на другом широкой стороной. В зависимости от тепловых нагрузок провода изолируются друг от друга и от железа ротора при помощи прессшпана или миканита (препарат из слюды). После запрессовки обмотки в пазы последние закрываются металлическими клиньями. На тело ротора насаживаются колпаки специальной стали высокого качества (фиг. 241), защищающие головки обмоток от больших центробежных усилий. Иногда прибегают и к обматыванию головок бандажами из стальной проволоки.

Для уменьшения потерь от трения о воздух готовый ротор, наконец, еще раз обтачивается, благодаря чему достигается гладкая поверхность. Для вентиляции ротора предусматриваются осевые каналы в зубцах (фиг. 230). Охлаждающий воздух засасывается сбоку и отбрасывается через радиальные каналы к воздушному зазору. С обеих сторон ротора устраиваются два нагнетающих вентилятора (фиг. 239) для охлаждения статора.

Ток возбуждения подводится к обмоткам через угольно-бронзовые щетки и через контактные кольца. Последние изготавливаются при больших числах оборотов (турбогенераторы) из стали, изолируются от вала миканитовым кольцом и насаживаются на него в горячем виде.

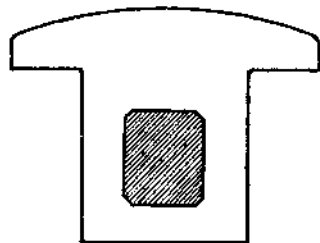
На фиг. 230 виден якорь возбуждательной машины, сидящий на одном валу с ротором турбогенератора.

В машинах с явными полюсами, соответствующими по своей конструкции полюсам машины постоянного тока, последние укрепляются к телу ротора различно в зависимости от механических нагрузок и центробежных усилий.

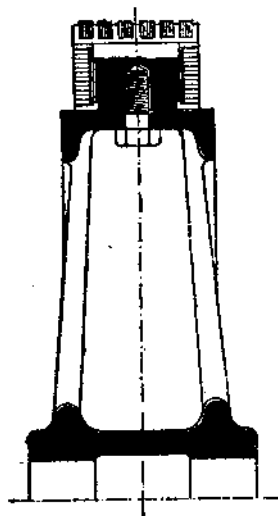
В малых машинах изготавливают из листов большей частью все тело ротора (фиг. 242). Листы при этом штампуются соответственно числу полюсов в виде многоугольников с вырезами, имеющими вид ласточкина хвоста, для насадки полюсов и с круглыми отверстиями по середине для насадки на вал. Листы скрепляются нажимными плитами и насаживаются на вал при помощи шпонки. Листы для полюсов штампуются из одного куска особо, а именно с полюсным башмаком и ласточкин хвостом для укрепления в массиве ротора. В ласточкином хвосте предусматривается вырез с круглым отверстием.

Листы полюсов скрепляются нажимными плитами и заклепками. После монтирования каркаса с обмоткой на готовый полюс последний укрепляется в прорезе (ласточкин хвост) тела ротора; при помощи круглого клина плечи ласточкина хвоста распираются, благодаря чему укрепляются в своем гнезде.

При больших диаметрах ротора тело ярма не может быть выштамповано из целых листов. В этом случае пазы для укрепления полюса простираются в массивных ободах, насаживаемых на втулку или на



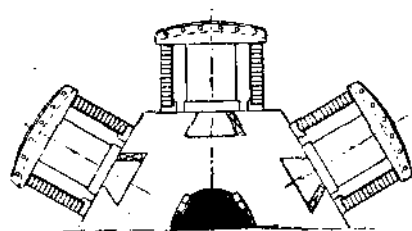
Фиг. 243. Полюс из железных листов, укрепляемых на массивном бруске.



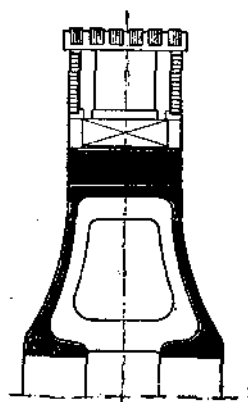
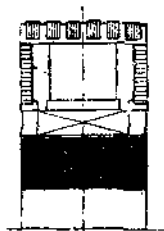
Фиг. 244. Колесо со спицами и с полюсами, укрепленными изнутри при помощи болтов.

крестовину. В других конструкциях в листах сердечника полюса штампуются четырехугольные отверстия, через которые пропускается массивная полоса. Болтами, направленными радиально, эта полоса, а тем самым и полюс изнутри прикрепляются к ободу со спицами (фиг. 243).

При незначительных окружных скоростях и достаточно большом диаметре массивные полюсы также прикрепляются болтами к ободу ротора (фиг. 244). При больших окружных скоростях выбирают укрепление полюсов в виде ласточкина хвоста. При небольших диаметрах соответствующие пазы строгаются в откованном теле ротора (фиг. 245),

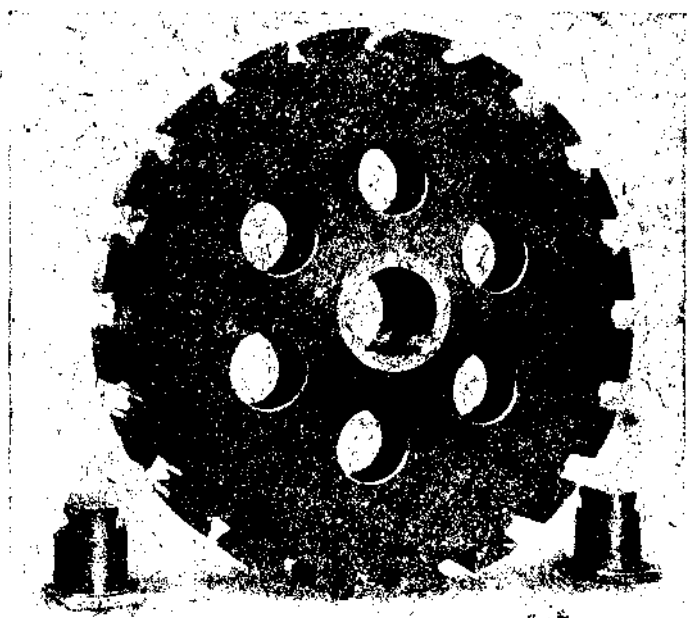


Фиг. 245. Укрепление полюсов при помощи „ласточкиных хвостов“.



Фиг. 246. Тело ротора с промежуточной втулкой для укрепления полюсов при помощи „ласточкиных хвостов“.

при больших же диаметрах пазы в виде ласточкина хвоста протрагиваются в кольцах, насаженных на промежуточные втулки (фиг. 246). Укрепление



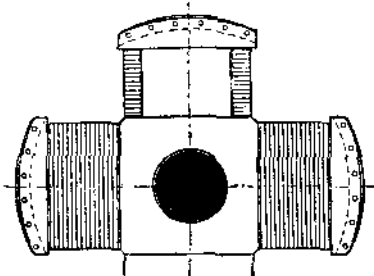
Фиг. 247. Тело ротора и полюса для укрепления при помощи „ласточкиных хвостов“.

полюсов осуществляется при помощи клиньев, загоняемых сбоку ласточкина хвоста (фиг. 245) или под ним (фиг. 247). При очень больших окруж-

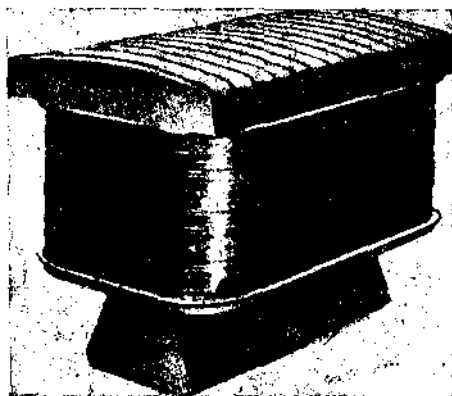
ных скоростях сердечники полюсов и втулка (а иногда и вал) выковываются из одного куска, а плиты полюсных башмаков прикрепляются после монтировки магнитных катушек (фиг. 248).

Полюсные башмаки редко делаются массивными, так как благодаря этому даже при полузакрытых пазах и больших воздушных зазорах (А, § 9) возникают большие потери в поверхностях полюсных башмаков. Для составления полюсных башмаков из отдельных листов в массивных башмаках выфрезовывается несколько пазов, в которые укладываются пакеты из железных тонких пластин. Последние прикрепляются к полюсам при помощи болтов, проходящих в поперечном направлении через пластины и ребра пазов. Применяется также и крепление пластин к полюсным башмакам, имеющее вид ласточкина хвоста.

Если полюсы требуется снабдить демпферной обмоткой, то в пластинах полюсных башмаков следует выштамповать соответствующие отверстия (фиг. 242), через которые затем продеваются стержни обмотки. Последние соединяются между собою при помощи двух колец, расположенных по обеим сторонам полюсов (фиг. 253).



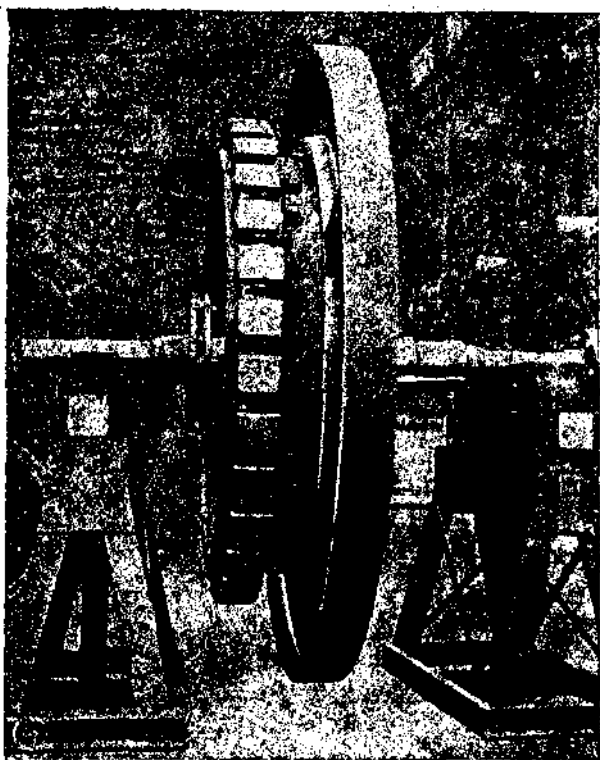
Фиг. 248. Втулка ротора и полюса, изготовленные из одного куска.



Фиг. 249. Полюс с собранным из листов башмаком и обмотка из ленточной меди (крепление „ласточкиным хвостом“).

Массивные сердечники полюсов выполняются с круглым (фиг. 247) или прямоугольным (фиг. 249 и 253) (а иногда и овальным) сечением. Мерой для формы поперечного сечения сердечника является отношение $l_1 : \tau$ расчетной длины якоря к полюсному делению. При рассмотрении машины постоянного тока (А, § 12) было показано, что это отношение из экономических соображений должно оставаться в определенных границах. Если это отношение мало (большой диаметр, небольшая длина), то лобовые соединения (неактивные в магнитном отношении) будут составлять значительную часть всей длины, правда, статорной обмотки, и вес меди статора будет, следовательно, велик; при больших значениях $l_1 : \tau$ (длинная машина) будет велика средняя длина провода обмотки возбуждения при заданном поперечном сечении сердечника, следовательно, будет велик вес меди ротора. Так как обработка меди ротора проще, а потому и дешевле, чем обработка меди статора, то машина с длинными полюсами будет (до определенных пределов) дешевле, чем машина с круглыми полюсами. Во многих случаях, однако, бывает желательно, чтобы ротор в синхронных машинах (генераторы) обладал большим маховым моментом (GD^2) (коэффициент неравномерности, В, § 6; параллельная работа, В, § 6; регулировка при гидравлических силовых машинах). Наименьший расход железа при заданном GD^2 мы имеем при выборе большого диаметра. Последнее ведет

к незначительным величинам $I_1 \tau$ и к машинам с круглыми полюсами. Если и в данном случае не удастся получить потребного махового момента без значительного утяжеления обода ротора, то целесообразно применять конструкцию, представленную на фиг. 250, где маховые массы сосредоточены главным образом в боковом шкиве большего диаметра, чем связанный с ним ротор. Благодаря такому боковому шкиву (фиг. 250) маховая масса неотяжеленного ротора утраивается при увеличении веса в 1,7 раза¹⁾.



Фиг. 250. Ротор с боковым колесом.

При устройстве обмотки возбуждения можно в основном руководствоваться теми же соображениями, что и при машине постоянного тока. Поперечное сечение провода (ур. 194) зависит не только от потребного числа ампер-витков и средней длины провода, но главным образом от напряжения возбуждения. Это напряжение может быть произвольно выбрано, поскольку мы имеем дело с самовозбуждением, а не с возбуждением от наличного постороннего источника (сеть, батарея). Для машин малой мощности даже при низких напряжениях возбуждения получаются лишь незначительные поперечные сечения провода. Здесь применяется плоский провод с двойной оплеткой, наматываемый на катушечный каркас, склепанный из жести и изнутри изолированный прессшпаном (фиг. 219). То же самое действительно и для машин больших мощностей и с высокими напряжениями возбуждения. При больших мощностях обычно стремятся,

¹⁾ В. Kaufman. Neue Läuferkonstruktion für Wechselstrom-Synchronmaschinen. Siemens-Ztschr. Heft. 4 S. 161, 1925.

путем выбора соответствующего низкого напряжения возбуждения, к получению таких больших поперечных сечений провода, чтобы оказалось возможным применение обмотки с голыми проводами (фиг. 248 и 249).

Последние изготавливаются из плоской меди и наматываются ребром на сердечник полюса; отдельные витки изолируются друг от друга бумажными прокладками. Кроме того, вся катушка изолируется прессшпаном от железа ротора или от каркаса. Такая катушка отличается чрезвычайно высокой теплоотдачей (охлаждение), так как голая медь приходит в непосредственное соприкосновение с воздухом, и тепло, созданное в катушке благодаря однослойности обмотки, быстро проходит через ширину медной ленты и передается на наружную поверхность.

При высоких окружных скоростях катушки полюсов должны быть защищены от центробежных сил при помощи особых держателей обмоток.

Для лучшего охлаждения машины сбоку на роторе устраиваются боковые крылья или направляющие листы, проталкивающие охлаждающий воздух через пути в машине (В, § 7; фиг. 258).

§ 8. Расчет синхронной машины переменного тока.

Способ расчета синхронной машины мы в дальнейшем покажем на примере выполненной машины. Для этой цели выбран синхронный генератор трехфазного тока фирмы Сименс-Шуккерт со следующей табличкой мощности (фиг. 251):

Междуфазовое напряжение	$U_p = 6700 \text{ В}$
Линейный ток	$I = 302 \text{ А}$
Кажущаяся мощность	$N_s = 3500 \text{ kVA.}$
Коэффициент мощности	$\cos \varphi = 0,8.$
Частота	50 пер./сек.
Число фаз	$m = 3.$
Соединение обмотки статора	звезда.
Число оборотов	$n = 214 \text{ об./мин.} + 85\%.$

Генератор построен для непосредственного привода от гидравлической машины с вертикальным валом (фиг. 252). Генератор должен выдерживать увеличение числа оборотов до 185% от номинального при разноразности турбины (например, при порче регулятора в момент внезапных разгрузок).

Для суждения о величине машины переменного тока принято задаваться ее кажущейся мощностью [N_s в вольтамперах или киловольт-амперах (kVA)] и коэффициентом мощности ($\cos \varphi$), так как данные об активной мощности:

$$N = N_s \cos \varphi \dots \dots \dots (585a)$$

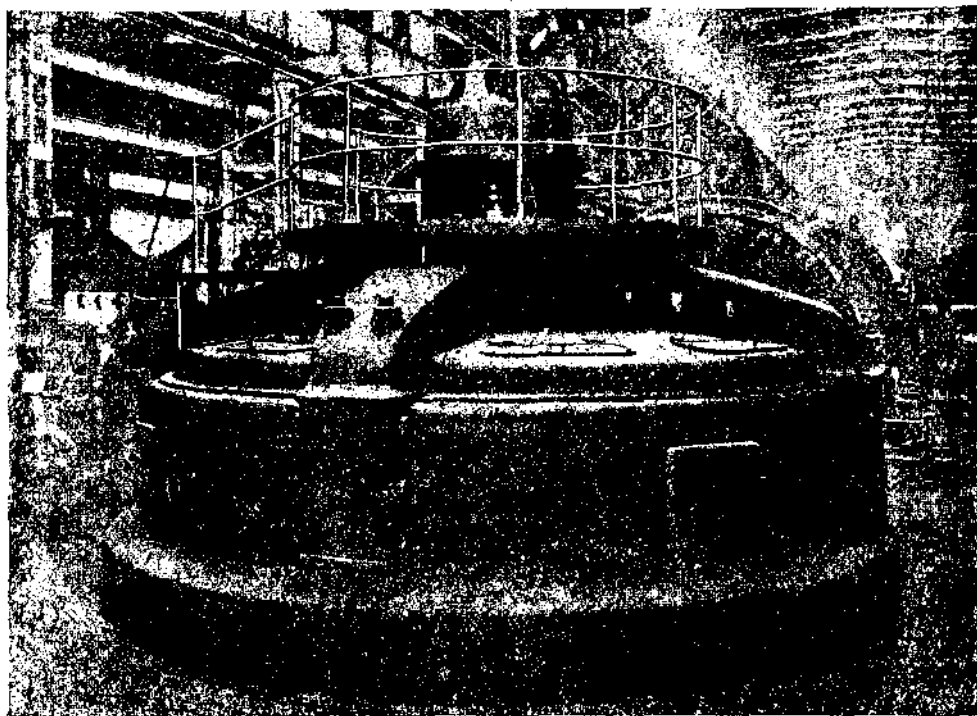
не дают однозначного представления об использовании машины. Соответственно этому относят ко внутренней кажущейся мощности также и коэффициент использования или пропорциональный ему средний момент вращения.

Аналогично ур. (210 a), кажущийся момент вращения в машинах переменного тока равен

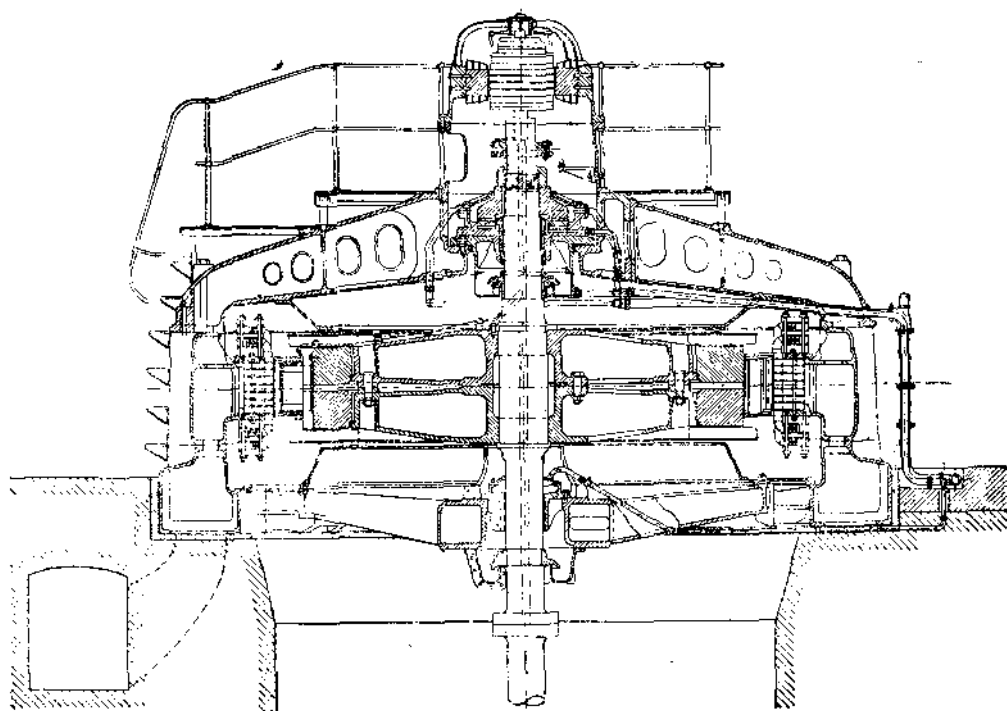
$$\sigma_s = \frac{N_{si}}{\pi^2 \frac{n}{60} I_1 D^2} \text{ джоулей/см}^3 \dots \dots \dots (586)$$

Внутренняя кажущаяся мощность m -фазной машины переменного тока равна (ур. 455)

$$N_m = m EI \dots \dots \dots (587)$$



Фиг. 251 Совершенно закрытый генератор с вертикальным валом 3500 кВА, 214 об./мин.

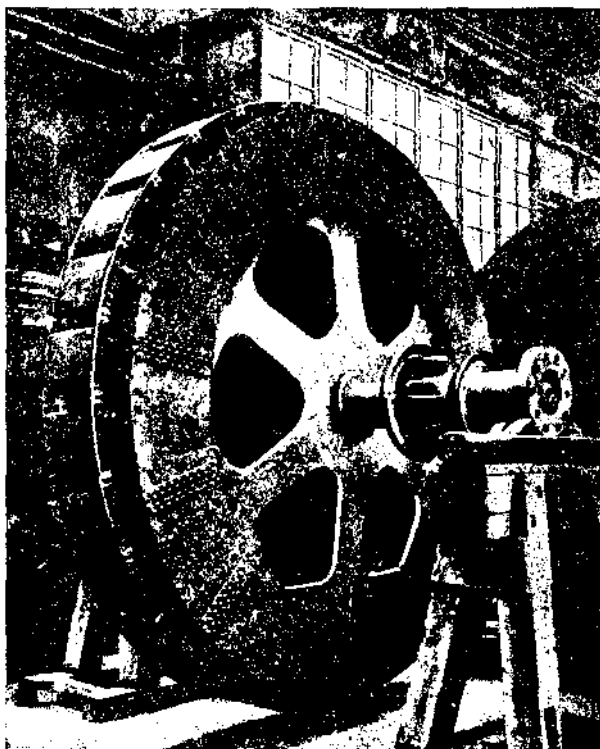


Фиг. 252. Разрез генератора, изображенного на фиг. 251.

При синусоидальном распределении индукции по окружности якоря уравнение ЭДС одной фазы гласит (ур. 486):

$$\begin{aligned} E &= 4,44 \cdot \xi \cdot \frac{\omega}{m} \cdot f \cdot \Phi_1 \cdot 10^{-8} = \\ &= 4,44 \cdot \xi \cdot \frac{z}{2m} \cdot \frac{pn}{60} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot l_t \cdot \tau \cdot B_1 \cdot 10^{-8} = \\ &= 1,11 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \xi \cdot \frac{z}{m} \cdot \frac{n}{60} \cdot \pi \cdot l_t \cdot D \cdot B_1 \cdot 10^{-8} \text{ вольт,} \end{aligned} \quad \dots (588)$$

где $\frac{z}{m}$ — число последовательно соединенных проводов одной фазы.



Фиг. 253. Ротор генератора фиг. 253.

Подставив ур. (587) в ур. (586), мы получим:

$$\sigma_s = 1,11 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \xi \cdot \frac{l \cdot z}{\pi \cdot D} \cdot B_1 \cdot 10^{-8} = 1,11 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \xi \cdot A \cdot B_1 \cdot 10^{-8} \text{ джоулей/см}^3 \quad (589)$$

Для трехфазной хорошо распределенной (шестизонной) обмотки обмоточный коэффициент (В, § 2) равен

$$\xi = 0,955.$$

Таким образом, ур. (589) выразится

$$\sigma_s^{III} \approx 0,675 \cdot A \cdot B_1 \cdot 10^{-8} \text{ килоджоулей/м}^3 \quad \dots (590)$$

В однофазных машинах обычно обмотаны, а значит и использованы в электрическом отношении лишь $\frac{2}{3}$ от окружности якоря (В, § 2). К тому же хуже обмоточный коэффициент (трехфазная обмотка). Кажущийся момент вращения для однофазных машин получится

$$\sigma_1 \approx 0,39 \cdot A \cdot B_1 \cdot 10^{-5} \text{ килоджоулей/м}^2 \quad \dots (591)$$

Сравнение с ур. (211а) показывает, что использование в трехфазной машине переменного тока теоретически такое же, как в машинах постоянного тока. Следует, однако, обратить внимание на то обстоятельство, что частота перемагничивания в машинах переменного тока (обычно 50 пер./сек.) большей частью значительно выше, чем в машинах постоянного тока (в среднем 30 пер./сек.). Согласно ур. (140) и (143) потери на гистерезис возрастают пропорционально первой степени, а потери на вихревые токи — пропорционально второй степени от частоты. Следовательно, для того, чтобы нагревание в железных частях машины переменного тока не получалось большим, чем в соответствующих частях машины постоянного тока, должна быть понижена индукция, а тем самым и использование машины. Добавочные потери в проводах обмотки якоря и потери на вихревые токи, вызванные полями рассеяния обмоточных головок в нажимных плитах и боковых щитах, ведут к уменьшению объема тока, что, в свою очередь, ведет к понижению использования машины. В машинах высокого напряжения большая часть лазового пространства расходуется на необходимую изоляцию и теряется, таким образом, с точки зрения электрического использования. Также и число полюсов машины оказывает влияние на возможность использования: при небольшом числе полюсов обмоточное пространство между двумя соседними полюсами сильно уменьшается по направлению к валу машины, а потому не может быть использовано в такой мере, как в машинах со многими полюсами, боковые поверхности которых почти параллельны одна другой. Все эти соображения следует принять в расчет при выборе степени использования машины.

Определение внутренней кажущейся мощности $N_{\text{вн}}$ машин переменного тока представляет большие трудности, так как отношение ЭДС E к напряжению у зажимов U может быть самым разнообразным в зависимости от коэффициента мощности и реакции рассеяния машины (фиг. 190 и 192). Целесообразно поэтому исходить из кажущейся мощности у зажимов машины, давая при этом кажущемуся моменту вращения лишь значение сравниваемой величины. Соответственно отношению ЭДС к напряжению у зажимов для сильных перевозбуждений машины принимают меньшие использования.

Использование машины трехфазного тока можно в первом приближении определить при помощи кривой на фиг. 136, при чем из полученных отсюда значений, сообразно с вышеприведенными рассуждениями, следует в среднем принять около 70% для кажущегося момента вращения, отнесенного к внешней мощности. При хорошей вентиляции или при выборе особенно теплостойкой изоляции (слюда), при которой допустимы большие нагревания машины, вышеуказанные значения могут быть увеличены на 80—90%. С другой стороны, при сильно перевозбужденных машинах и при машинах с изоляцией для высокого напряжения следует выбирать меньшие значения (около 60%).

При определении размеров рассматриваемой машины приходилось учитывать специальное требование, предъявлявшееся к машине. Оно заключалось в том, что обмотка статора должна была выдержать при испы-

тании напряжение в 18000 вольт в продолжение одной минуты, а одна катушка этой обмотки должна была выдержать 24000 вольт в продолжение 5 секунд. Это обстоятельство обуславливало изоляцию более сильную, чем это требовалось бы при данном номинальном напряжении. Таким образом, электрическое использование машины будет здесь меньше, чем при нормальном выполнении.

Если не поставлены особые требования относительно махового момента, соотношений в размерах и т. п., то при выборе диаметра отверстия статора D целесообразно исходить из окружной скорости, которую выбирают с таким расчетом, чтобы укрепление полюсов не представляло особых конструктивных затруднений из-за центробежных усилий. Средние окружные скорости — 30—50 м/сек. Принимая D в м и n — в об./мин., мы найдем окружную скорость v в м/сек. при $f=50$ пер./сек. из ур. (470):

$$v = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{D \cdot \pi \cdot f}{p} = \frac{D \cdot \pi \cdot 100}{2p} \text{ м/сек.} \quad (592)$$

Взяв D в см, мы получим, следовательно, для τ в см

$$\tau = \frac{D \cdot \pi}{2p} \text{ см} \quad (593)$$

Таким образом, при 50 пер./сек. величина τ в см будет численно равна окружной скорости v в м/сек.

Из соображений экономичности (ср. В, § 7) отношение $\lambda = \frac{l_i}{\tau}$ расчетной длины статора к полюсной дуге не должно выходить из определенных границ. Средние значения следующие: для машин малой мощности с явными полюсами:

$$\lambda = 0,8 \div 1,5;$$

для машин большой мощности с явными полюсами:

$$\lambda = 1,5 \div 2,5;$$

для турбогенераторов:

$$\lambda = 1,0 \div 4.$$

В рассматриваемом случае диаметр отверстия статора взят равным

$$D = 400 \text{ см;} \quad (594)$$

суммарная длина якоря соответственно ур. (227):

$$l_a = l_p + n \cdot s = 34 + 6 \cdot 1 = 40 \text{ см} \quad (595)$$

В осевом направлении кольцевое тело статора для лучшего отведения тепловых потерь (В, § 7) разделено на семь пакетов, толщиной каждый в

$$\frac{340}{7} = 48,6 \text{ мм} \quad (596)$$

Осевая длина полюсного башмака выбирается обычно равной длине всего якоря

$$l_p = l_a = 40 \text{ см} \quad (597)$$

Таким образом, расчетная длина якоря будет равна (ур. 49):

$$l_i = \frac{l_2 + l_a}{2} = \frac{40 + 34}{2} = 37 \text{ см.} \quad (598)$$

Число полюсов (ур. 576):

$$2p = \frac{2 \cdot f \cdot 60}{n} = \frac{2 \cdot 50 \cdot 60}{214} = 28 \text{ полюсов} \dots (599)$$

Полюсное деление (ур. 593):

$$\tau = \frac{D\pi}{2p} = \frac{400\pi}{28} = 44,9 \text{ см} = v \text{ в м/сек} \dots (600)$$

Отношение расчетной длины статора к полюсному делению:

$$\lambda = \frac{l_i}{\tau} = \frac{37}{44,9} = 0,825 \dots (601)$$

Диаметр выбран, следовательно, несколько большим. У гидросиловых генераторов это случается часто, так как слишком малые значения для λ при одинаковом расходе материала ведут к большим маховым моментам, что желательно с точки зрения спокойной работы регуляторов.

Кажущийся момент вращения, характеризующий использование машины, равен (ур. 586):

$$\sigma_s = \frac{N_s}{\pi^2 \cdot \frac{\pi}{60} \cdot l_i \cdot D^2} = \frac{3\,500\,000}{\pi^2 \cdot \frac{214}{60} \cdot 37 \cdot 400^2} = 0,0167 \text{ джоулей/см}^3 = 16,7 \text{ килоджоулей/м}^3. (602)$$

Это составляет около 57% от значения, получаемого из кривой на фиг. 136.

Использование машины, благодаря тяжелым условиям изоляции, здесь меньше, чем это следовало бы для нормального случая.

Выбор главных размеров машины обуславливает и ее использование, а, следовательно, и произведение $A \cdot B_1$ из ур. (590), выбор определенного напряжения рассеяния (ур. 548) дает нам отношение $A : B_1$. Не трудно поэтому определить в первом приближении значения для A и B_1 .

Обозначив ради простоты величину напряжения рассеяния E_s в процентах от номинального напряжения:

$$e_s = \frac{E_s}{U} \cdot 100, \dots (603)$$

мы получим после объединения ур. (590) и ур. (548):

$$A = \sqrt{\frac{\tau_s \cdot e_s \cdot 10^3}{0,675 \cdot \tau_s}} \dots (604)$$

и

$$B_1 = \sqrt{\frac{\sigma_s \cdot \tau_s \cdot 10^7}{0,675 \cdot e_s}} \dots (605)$$

К вопросу о выборе напряжения рассеяния необходимо отметить следующее: наименьшее допустимое значение напряжения рассеяния определяется из того условия, что, согласно нормам (REM 1923 § 47), имеется максимально допустимое значение для наибольшей амплитуды мгновенного тока короткого замыкания, найденной для данного напряжения рассеяния (ур. 575). Соответственно этому наименьшее допустимое значение напряжения рассеяния в машинах с явными полюсами и демпферными обмотками составляет 12% от номинального напряжения (В, § 5). Для машин с явными полюсами без демпферных обмоток можно допустить меньшие значения (приблизительно до 8%), так как здесь мгновенный ток короткого замыкания ограничен по своей величине рассеянием отверстия статора. Большие значения напряжения рассеяния ведут

к очень большим изменениям напряжения при изменениях нагрузки. Последние, правда, могут быть компенсированы современными быстродействующими регуляторами; однако, при этом трудно избежать, чтобы машина, например, при внезапной полной разгрузке (выпадение главного рубильника), находилась хотя бы и весьма короткое время под полным напряжением. Напряжение рассеяния поэтому редко принимают большим, чем, приблизительно, 18%.

В заданных пределах мерой для выбора напряжения рассеяния является, главным образом, использование машины. При сильном использовании машины целесообразно выбирать большие значения для напряжения рассеяния, так как в большинстве случаев этим самым достигается разгрузка ротора; в этом случае проектирование ротора из-за недостатка места при машинах с внутренними полюсами обычно представляет большие трудности, чем проектирование статора. В слабо использованных машинах принимают меньшие значения для напряжения рассеяния для того, чтобы не получать больших изменений напряжения.

Рассматриваемая машина, как это видно, не сильно использована. Так как она обладает демпферной обмоткой (фиг. 253), то для первого приближения можно принять приблизительно $e_s = 13\%$. Для коэффициента рассеяния можно взять среднее значение $\zeta = 4$ (В, § 4). Таким образом, из ур. (604) и (605) мы получим:

$$A = \sqrt{\frac{e_s \cdot e_n \cdot 10^3}{0,675 \cdot \zeta}} = \sqrt{\frac{16,7 \cdot 13 \cdot 10^3}{0,675 \cdot 4}} \approx 280 \text{ амп./см,} \quad \dots \quad (606)$$

$$B_1 = \sqrt{\frac{\sigma_s \cdot \zeta \cdot 10^7}{0,675 \cdot e_s}} = \sqrt{\frac{16,7 \cdot 4 \cdot 10^7}{0,675 \cdot 13}} \approx 8700 \text{ гауссов} \quad \dots \quad (607)$$

Эти значения находятся в пределах обычных величин (ур. 238) и могут быть положены в основу подсчета потребного числа витков.

Число последовательно соединенных витков w одной фазы равно [ур. (536) совместно с ур. (606) и (600)]:

$$w = \frac{A \cdot p \cdot \tau}{l \cdot m} = \frac{280 \cdot 14 \cdot 44,9}{302 \cdot 3} \approx 195 \text{ витков/фазу} \quad \dots \quad (608)$$

Общее число проводов:

$$z = 2 \cdot m \cdot w = 2 \cdot 3 \cdot 195 \approx 1170 \text{ проводов} \quad \dots \quad (609)$$

Это число проводов колеблется в небольших пределах в зависимости от выбранного числа пазов и пространственных соотношений в пазу. После этого, зная действительное число проводов, определяют соответствующие значения для A и B_1 .

Число пазов следует выбрать так, чтобы пазовое деление колебалось в пределах

$$t = 40 \div 70 \text{ мм} \quad \dots \quad (610)$$

Мелкие пазовые деления следует предпочесть, так как при них получается удовлетворительная синусоидальная кривая напряжения (В, § 2) и незначительные потери на поверхности полюсных башмаков (А, § 9). Однако, при мелких пазовых делениях использование пространства паза (особенно в машинах высокого напряжения с толстой изоляцией) настолько неудовлетворительно, что приходится выбирать более крупные деления.

В рассматриваемом случае для получения хорошей кривой напряжения (В, § 2) была принята обмотка с дробным числом пазов

$$q = 2,5 \text{ пазов на полюс и фазу} \quad \dots \quad (611)$$

индукционные линии выступают из полюсного башмака также и сбоку (фиг. 170), благодаря чему кривая поля еще более приближается к синусоиде (фиг. 169а). В этом случае ошибка будет незначительна, если принять коэффициент поля: $k_f = 1$, т.е. если считать поток основной волны равным действительному потоку. При незначительных перекрытиях полюса, как это имеет место в машинах с малым количеством полюсов, и при прямоугольной кривой поля коэффициент поля принимает значения, которыми не всегда можно пренебречь.

Для статора взята однослойная шестизонная обмотка с катушками, имеющими общую ось, схема которых представлена на фиг. 254.

При определении обмоточного коэффициента ξ необходимо учесть, что обмотка содержит катушки двух типов: двухкратные и трехкратные катушки. Так как оси катушек сдвинуты одна относительно другой в точности на два полюсных деления, то обмоточные коэффициенты обоих типов катушек можно определить отдельно и, соответственно различному числу отдельных катушек, подсчитать по правилу смещения величину результирующего обмоточного коэффициента.

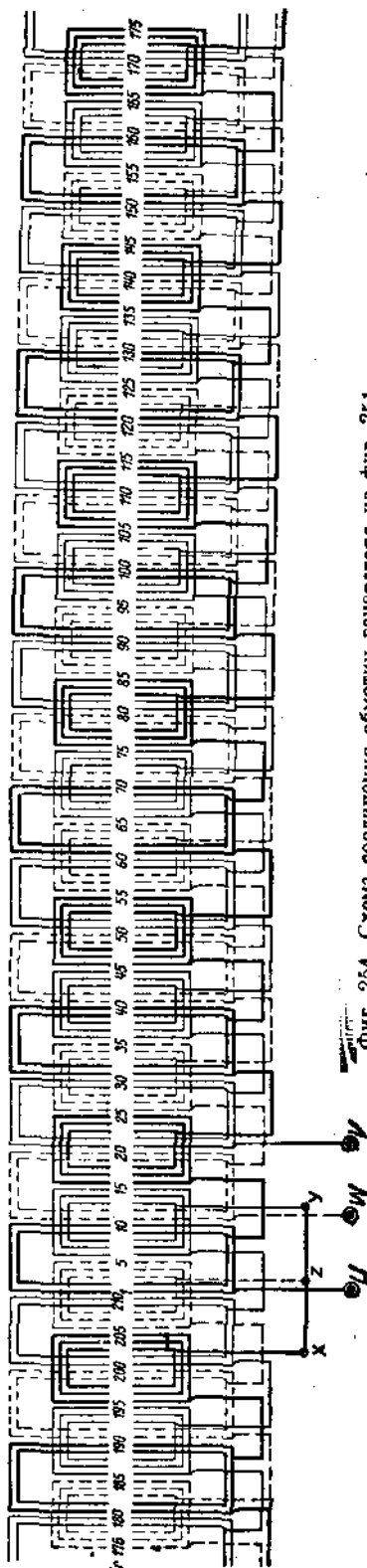
Выразив все ширины в пазовых делениях, мы получим из схемы следующие данные:

	Двухкратная катушка	Трехкратная катушка
Пазовое деление.	$t = 1$	
Полюсное деление.	$\tau = \frac{N}{2p} = \frac{210}{28} = 7,5$	
Ширина катушки.	$w'' = 8$	$w''' = 7$
„ зоны.	$s'' = 2$	$s''' = 3$

Таким образом, можно подсчитать обмоточные коэффициенты обоих типов катушек из ур. (474):

$$\left. \begin{aligned} \xi'' &= \sin\left(\frac{w''}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{s''}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{t}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right)} \cdot \frac{t}{s''} = \\ &= \sin\left(\frac{8}{7,5} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{2}{7,5} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{1}{7,5} \cdot \frac{\pi}{2}\right)} \cdot \frac{1}{2} = 0,972 \end{aligned} \right\} (618)$$

212



Фиг. 254. Схема соединения обмотки генератора из фиг. 251.

$$\xi''' = \sin\left(\frac{7}{7,5} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{3}{7,5} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{1}{7,5} \cdot \frac{\pi}{2}\right)} \cdot \frac{1}{3} = 0,937 \quad (619)$$

Результирующий обмоточный коэффициент по правилу смещения равен

$$\xi = \frac{2\xi'' + 3\xi'''}{5} = 0,951 \quad (620)$$

Коэффициент Каппа (Карр) равен (ур. 504):

$$k = 4,44\xi \cdot k_f = 4,44 \cdot 0,951 \cdot 1 = 4,22; \quad (621)$$

учитывая ур. (462), можно затем подсчитать магнитный поток при холостом ходе машины под номинальным напряжением (ур. 503а):

$$\Phi_1 = \frac{U_e \cdot 10^8}{\sqrt{3} \cdot k \cdot w \cdot f} = \frac{6700 \cdot 10^8}{\sqrt{3} \cdot 4,22 \cdot 205 \cdot 50} = 8,95 \cdot 10^6 \text{ максвелл} \quad (622)$$

Так как распределение индукции в воздушном зазоре по окружности якоря, как уже было упомянуто, может быть принято практически синусоидальным, то величина этой индукции определится из ур. (497):

$$B_1 = \frac{\pi \cdot \Phi}{2 \cdot l_i \cdot \tau} = \frac{\pi \cdot 8,95 \cdot 10^6}{2 \cdot 37 \cdot 44,9} = 8450 \text{ гауссов} \quad (623)$$

При отклонении кривой поля от синусоидальной формы действительное максимальное значение индукции (B) не будет больше соответствовать максимальному значению основной волны (B_1). Так как, однако, для магнитного напряжения в воздушном зазоре и в зубцах, а также для потерь в железе зубцов мерой является действительное максимальное значение индукции (B), то последнее, при отклонении кривой поля от синусоиды, должно определяться особо [например, при прямоугольной кривой поля из ур. (499)].

При выборе размеров паза необходимо следить за тем, чтобы индукция в зубцах не оказалась слишком большой. В машинах на 50 периодов максимальная индукция в зубцах по возможности не должна превосходить $B_{z \max} = 17000$ гауссов, так как в противном случае при высокой частоте (в сравнении с частотой перемагничивания, встречающейся в машинах постоянного тока) потери, а, следовательно, и нагревания в зубцах стали бы чрезмерными. При этих значениях можно с достаточной точностью считать (А, § 5) кажущуюся индукцию равной действительной.

Ширина паза была взята:

$$b_N = 23 \text{ мм} \quad (624)$$

При машинах с внутренними полюсами максимальную индукцию следует ожидать в головке зубца, для которого

$$d_z = D, \quad (625)$$

Таким образом, из ур. (61) мы имеем:

$$\left. \begin{aligned} B_{z \max} &= \frac{l_i}{k_E \cdot l_e} \cdot \frac{\pi D}{\pi D - b_N \cdot N} \cdot B_L = \\ &= \frac{37}{0,9 \cdot 34} = \frac{\pi \cdot 400}{\pi \cdot 400 - 2,3 \cdot 210} \cdot 8450 = 16600 \text{ гауссов} \end{aligned} \right\} \quad (626)$$

Затем определяется глубина паза, необходимая для полной укладки обмотки.

Для подсчета поперечного сечения провода обмотки статора выбирают плотность тока между $2,5 \div 4$ амп./мм². Большая толщина изолирующих гильз препятствует отведению тепла, созданного в обмотке статора, по направлению к железу, а, следовательно, к охлаждающим поверхностям; здесь выбираются небольшие плотности тока. В машинах небольшой длины в осевом направлении и с большой окружной скоростью (полюсное деление) значительная часть обмотки статора расположена в хорошо охлаждающихся головках обмоток; здесь можно взять большую плотность тока.

Из-за большой силы тока провод в поперечном сечении был разделен на четыре параллельных частичных проводника

$$q = 4 \times [7 \times 3,8] = 4 \times 26,1 = 104,4 \text{ мм}^2 \dots\dots\dots (627)$$

(благодаря закруглению краев действительное поперечное сечение провода несколько меньше расчетного).

Таким образом, плотность тока равна

$$a = \frac{I}{q} = \frac{302}{104,4} = 2,89 \text{ амп./мм}^2 \dots\dots\dots (628)$$

Для уменьшения добавочных джоулевых потерь частичные провода изолируются друг от друга. Эта изоляция не должна быть слишком толстой, так как между частичными проводами, при правильной их прокладке нет разности напряжения (В, § 7). Была принята двухкратная хлопчатобумажная оплетка, общей толщиной в 0,3 мм с одной стороны.

Для избежания воздушных промежутков между проводниками обмотки для высоких напряжений асфальтируются особой заполняющей массой. Для этого при подсчете пазового пространства к размерам меди следует сделать надбавку около $8 \div 9\%$. Для толщины гильзы можно приблизительно принять следующие значения:

до 3 000 вольт	— 2 мм
" 6 000 "	— 3 "
" 10 000 "	— 4,5 "

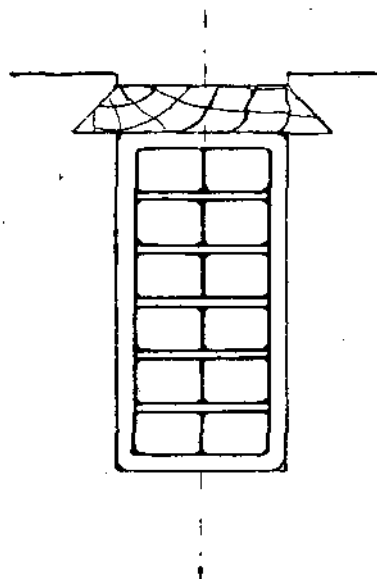
Наконец, следует предусмотреть еще запас по меньшей мере в 0,5 мм (при длинных машинах — больше) для облегчения укладки катушки в пазу.

Отсюда получаем следующее заполнение паза (фиг. 255)

Ширина:

Провод	$2 \times 7,0 = 14,0$ мм
Оплетка	$2 \times 0,3 = 0,6$ "
Асфальт	1,2 "
Гильза	$2 \times 3,3 = 6,6$ "
Запас	0,6 "

Итого ширина 23,0 мм



Фиг. 255. Заполнение паза.

Глубина:

	Паз с внутренней катушкой	Паз с входной катушкой
Провод	$12 \times 3,8 = 45,6 \text{ мм}$	$10 \times 3,8 = 38,0 \text{ мм}$
Оплетка	$12 \times 0,3 = 3,6 \text{ „}$	$10 \times 0,3 = 3,0 \text{ „}$
Асфальт	3,7 „	3,2 „
Промежуточная прокладка	$5 \times 2,0 = 10,0 \text{ „}$	$4 \times 4,5 = 18,0 \text{ „}$
Гильза	$2 \times 3,3 = 6,6 \text{ „}$	$2 \times 3,3 = 6,6 \text{ „}$
Запас	0,5 „	0,5 „
Итого глубина	70,0 мм	69,3 мм

К этому следует прибавить высоту клина около 7 мм.

Путем измерений для этой обмотки получилось рассеяние:

$$e_s = 13,7\% \quad (629)$$

Отсюда получается коэффициент рассеяния (ур. 548)

$$\zeta = \frac{e_s}{100} \cdot \frac{B}{A} = \frac{13,7}{100} \cdot \frac{8450}{296} = 3,91 \quad (630)$$

При больших диаметрах машины изменение ширины зубца в зависимости от глубины незначительно. Достаточно точные данные получаются поэтому если в основу определения магнитного напряжения в зубцах и подсчета потерь в железе зубцов мы положим в качестве среднего значения индукцию в том месте зубца, которое отстоит на $\frac{1}{3}$ высоты последнего от его самого узкого места (А, § 5 и 9).

Эта индукция равна:

$$\left. \begin{aligned} B_{\text{сред}} &= \frac{\pi \cdot D}{\pi \left(D + 2 \cdot \frac{1}{3} h_z \right) - b_N \cdot N} \cdot \frac{l_l}{k_E \cdot l_s} \cdot B_L = \\ &= \frac{\pi \cdot 400}{\pi \left(400 + 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot 7,7 \right) - 2,3 \cdot 210} \cdot \frac{37}{0,9 \cdot 84} \cdot 8450 = 16300 \end{aligned} \right\} \quad (631)$$

Наружный диаметр пакета из листов якоря выбирают с таким расчетом, чтобы средняя индукция в теле якоря при холостом ходе под номинальным напряжением колебалась между 8000—12000 гауссов. Рекомендуется не иметь здесь чрезмерных индукций, а следовательно и потерь в железе, для того, чтобы тепло, созданное в зубцах якоря и в обмотке, могло здесь хорошо отводиться и таким образом достигать охлаждаемых поверхностей. В рассматриваемом случае наружный диаметр пакета был взят равным

$$D_a = 450 \text{ см} \quad (632)$$

Таким образом высота тела якоря в радиальном направлении выражается:

$$h_A = \frac{D_a - D}{2} - h_z = \frac{450 - 400}{2} - 7,7 = 17,3 \text{ см} \quad (633)$$

Средняя индукция в теле якоря при холостом ходе под номинальным напряжением равна (ур. 54):

$$B_A = \frac{\Phi}{1,8 \cdot l_s \cdot h_A} = \frac{8,95 \cdot 10^8}{1,8 \cdot 84 \cdot 17,3} = 8450 \text{ гауссов} \quad (634)$$

В сердечнике полюса можно допускать большие индукции, так как поток не подвергается здесь никаким периодическим колебаниям, а потому при стационарном режиме не возникает никаких потерь в железе. Также и недостаток места в машинах с внутренними полюсами, необходимого для более свободного размещения обмотки возбуждения, вынуждает к выбору узких сердечников, а следовательно и более высоких индукций. За средние значения при холостом ходе под номинальным напряжением принимаются индукции порядка $12\,000 \div 13\,500$ гауссов. Следует помнить, что через сердечник полюса должен проходить не только полезный поток Φ , но также и поток рассеяния Φ_s . Последний составляет при холостом ходе под номинальным напряжением в машинах с внутренними полюсами приблизительно $10 \div 25\%$ от полезного потока. Для рассматриваемой машины был найден поток рассеяния приблизительно в 15% . Таким образом, поток, проходящий через поперечное сечение полюсного сердечника, равен (уравнение 74):

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_s = \Phi + 0,15 \cdot \Phi = 1,15 \Phi = 1,15 \cdot 8,95 \cdot 10^6 = 10,3 \cdot 10^6 \text{ максвелл (635)}$$

Из-за высокой окружной скорости выбран массивный сердечник из симен-смартеповской стали, а также скрепление, имеющее форму ласточкина хвоста (фиг. 249).

Для уменьшения потерь на поверхностях полюсных башмаков последние собраны из железных пластин, прикрепленных к плите; последняя в свою очередь прикована к сердечнику.

Для поперечного сечения сердечника была принята прямоугольная форма. Осевая длина полюса большей частью берется несколько меньше, чем длина якоря, так что обмотка поддерживается полюсным башмаком, имеющим длину в осевом направлении, равную длине якоря. Так как обмотка возбуждения была взята однослойная из плоской голы меди, то для обеспечения достаточно большого радиуса изгиба провода, наматываемого ребром, пришлось закруглить ребра сердечника (фиг. 256).

Из фиг. 256 мы получаем поперечное сечение сердечника:

$$Q_m = 35 \cdot 24 - 2 \cdot 5^2 = 790 \text{ см}^2; \dots \dots \dots (636)$$

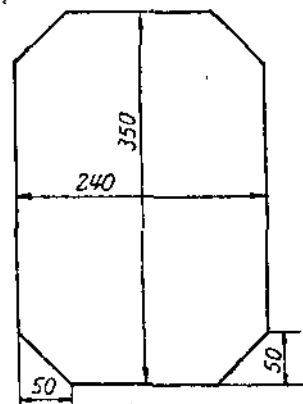
таким образом, индукция в сердечнике при холостом ходе под номинальным напряжением:

$$B_m = \frac{\Phi_m}{Q_m} = \frac{10,3 \cdot 10^6}{790} = 13\,000 \text{ гауссов} \dots \dots \dots (637)$$

В машинах с внутренними полюсами полюсное ярмо образуется ободом. Поперечное сечение последнего устраивается из соображений механической прочности настолько большим, что возникающие в нем индукции весьма незначительны.

Магнитная характеристика для синхронных машин рассчитывается точно так же, как и для машин постоянного тока. Ход расчета будет показан на примере определения точки холостого хода для номинального напряжения. Для нескольких других точек собраны данные расчета в таблице, приводимой ниже.

Магнитное напряжение в обоих воздушных зазорах определяется из ур. (53). Учитывая ограниченность пространства для



Фиг. 256. Поперечное сечение полюсного сердечника.

укрепления обмотки возбуждения при машинах с внутренними полюсами, необходимо заботиться о том, чтобы ширина воздушного зазора δ была возможно меньшей. Однако, для уменьшения искажающего влияния поля якоря приходится выбирать воздушный зазор не слишком малым (А, § 6). Кроме того, влияние пазов на форму волны ЭДС (В, § 2) и на поверхностные потери в полюсных башмаках (А, § 9) будет тем меньше, чем больше зазор δ . Наконец, для устойчивой работы машины может потребоваться увеличение ампер-витков поля возбуждения (В, § 5), что проще всего достигается при увеличении воздушного зазора.

Средние значения для ширины зазора принимаются:

$$\delta = 1,2 \div 1,5\% \text{ от } \tau \dots\dots\dots (638)$$

При очень больших диаметрах машины из конструктивных соображений может оказаться необходимым выбор воздушного зазора большего, чем это необходимо с электрической точки зрения.

В этом отношении необходимо, чтобы:

$$\delta \geq 0,1\% D \dots\dots\dots (639)$$

Было взято:

$$\delta = 6 \text{ мм в самом узком месте} = 1,335\% \text{ от } \tau = 0,15\% \text{ от } D \dots (640)$$

При концентрических очертаниях полюсного башмака берут большей частью, более широкие воздушные зазоры, так как кривая поля теряет при этом свою крутую форму и больше приближается к синусоиде.

Коэффициент Картера равен (ур. 52):

$$k_c = \frac{t(5\delta + s)}{t(5\delta + s) - s^2} = \frac{59,9(5 \cdot 6 + 23)}{59,9(5 \cdot 6 + 23) - 23^2} = 1,2 \dots\dots\dots (641)$$

Таким образом, магнитное напряжение в обоих воздушных зазорах равно

$$2 V_L = 1,6 k_c \cdot \delta \cdot B_L l = 1,6 \cdot 1,2 \cdot 0,6 \cdot 8450 = 9720 \text{ амп.} \dots\dots\dots (642)$$

Средняя индукция в железе якоря определяется из ур. (634)

Из кривой намагничивания (фиг. 35) получается для этого случая напряжение поля:

$$H_A = 2,3 \text{ амп./см} \dots\dots\dots (643)$$

Средняя длина пути в железе якоря (ур. 55):

$$L_A = \frac{\pi D_a}{2p} = \frac{\pi \cdot 450}{28} = 50,5 \text{ см} \dots\dots\dots (644)$$

Таким образом, магнитное напряжение в железе якоря будет равно ур. 56):

$$V_A = L_A \cdot H_A = 50,5 \cdot 2,3 = 116 \text{ амп.} \dots\dots\dots (645)$$

Средняя индукция в зубце определяется из ур. (631). Напряжение поля здесь равно (фиг. 35):

$$H_Z = 45 \text{ амп./см} \dots\dots\dots (646)$$

За длину пути в зубце следует принимать высоту зубца, включая высоту клина; таким образом магнитное напряжение в зубцах равно

$$2 V_Z = 2 \cdot h_Z \cdot H_Z = 2 \cdot 7,7 \cdot 45 = 693 \text{ амп.} \dots\dots\dots (647)$$

Индукция в поперечном сечении полюса была определена из ур. (637). Длина полюсного сердечника зависит от обмотки возбуждения

и от соотношения размеров ротора. При предварительном расчете здесь пришлось бы оценить суммарное потребное число ампер-витков магнитной цепи при нагрузке и затем спроектировать полюс и обмотку возбуждения. Найденные таким образом размеры полюса принимаются за основу при расчете магнитной характеристики. Получаемые здесь ампер-витки при нагрузке более или менее отклоняются от предполагаемого значения, что при известных обстоятельствах влечет за собой незначительные изменения в размерах полюсов. После этого каждый раз следует проверять, оказывают ли эти изменения какое-либо влияние на предварительно рассчитанную характеристику и, если необходимо, исправлять последнюю.

Для генератора с коэффициентом мощности $\cos \varphi = 0,8$ при перевозбуждении суммарное число потребных ампер-витков магнитной цепи при нагрузке может быть оценено в:

$$\Theta \approx 2,5 \cdot (2 V_L) \dots \dots \dots (648)$$

В рассматриваемой машине была принята высота сердечника

$$h_m = 16 \text{ см} \dots \dots \dots (649)$$

Так как магнитное напряжение в полюсных башмаках и ярме может быть подсчитано лишь неточно, то его принято учитывать в виде некоторой надбавки, приблизительно в $10 \div 30\%$, к длине полюсного сердечника.

Материал массивного полюса (в рассматриваемом случае сиенс-мартеновская сталь) большей частью намагничивается хуже, чем динамное железо; магнитное напряжение на каждый сантиметр при одинаковой индукции будет следовательно больше. Так как намагничивание различных материалов полюса различно, то не следует обращать внимание на различие кривых намагничивания для материалов, применяемых в рассматриваемой машине.

Необходимо лишь брать правильные значения так, чтобы в случае надобности кривая намагничивания материала полюса легко могла быть построена по этим значениям.

Напряжение поля для индукции в сердечнике, найденной из ур. (637), будет равно для применяемого здесь материала полюса

$$H_m = 22,4 \text{ амп./см} \dots \dots \dots (650)$$

Таким образом, магнитное напряжение в полюсах и в ярме равно

$$2 V_m + V_j = 1,3 (2 \cdot h_m) \cdot H_m = 1,3 \cdot 2 \cdot 16 \cdot 22,4 = 931 \text{ амп.} \dots \dots (651)$$

Суммируя все частичные напряжения, можно определить ампер-витки в магнитной цепи, необходимые для создания номинального напряжения при холостом ходе с номинальным числом оборотов:

Воздух [ур. (642)]	$\dots \dots \dots 2 V_L = 9720 \text{ амп.}$	(652)
Тело якоря [ур. (645)]	$\dots \dots \dots V_A = 116 \text{ „}$	
Зубцы якоря [ур. (647)]	$\dots \dots \dots 2 V_z = 693 \text{ „}$	
Полюса и ярмо [ур. (651)]	$\dots \dots \dots 2 V_m + V_j = 931 \text{ „}$	
$\Theta = \Sigma V = 11460 \text{ амп.}$		

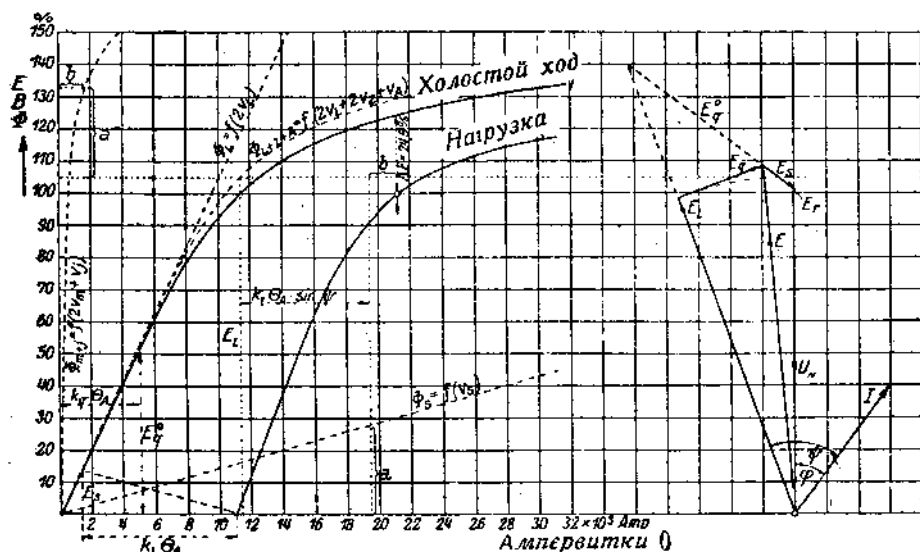
В таблице приведены значения различных частичных напряжений для нескольких других точек характеристики холостого хода (напряжения выражены в процентах от нормального напряжения U). Для подсчета

частичных напряжений в полюсах и ярме был взят не действительный поток (включая поток рассеяния), а тот же поток, что и для других частичных напряжений (ср. А, § 12); так как для полюсов и ярма строится отдельная частичная характеристика, то безразлично, для каких потоков подсчитываются, отдельные точки.

ТАБЛИЦА.

% от U_N	B_L	$\Phi \cdot 10^{-6}$	$2V_L$	B_A	H_A	V_A	B_Z' средн.	B_L' средн.	H_Z средн.	$2V_Z$	B_m	H_m	$2V_m + V_J$	$2V_L + 2V_Z + V_A$
100	8 450	8,95	9 720	8 450	2,3	118	16 300	—	45	693	11 300	15,2	633	10 530
110	9 300	9,85	10 700	9 300	2,6	127	17 900	—	117	1 803	12 500	19,9	830	12 630
120	10 150	10,74	11 700	10 150	3,2	162	19 600	19 400 ¹⁾	250	3 850	13 600	26	1 080	15 560
130	11 000	11,64	12 600	11 000	3,7	187	21 200	20 700	580	8 940	14 750	35,5	1 480	21 730
140	11 850	12,53	13 600	11 850	4,7	237	22 800	21 700	1 050	16 170	15 900	55,2	2 300	30 000

На фиг. 257 графически представлены отдельные частичные характеристики, а по ним построена характеристика холостого хода согласно А, § 5 (фиг. 44). Для определения ампер-витков, необходимых для номинального режима работы, пользуются полярной диаграммой (В, § 5). Исходят из заданного напряжения сети U_N , которое целесообразно нанести на гра-



Фиг. 257. Векторная диаграмма и характеристики генератора из фиг. 251.

вленным вниз; величина U_N для избежания пересчетов масштаба принята на фиг. 257 за 100% по оси ординат. Угол сдвига фаз между напряжением и током определяется коэффициентом мощности сети ($\cos \varphi = 0,8$). Затем, соответственно фиг. 205, вектор напряжения геометрически суммируется с векторами омического и индуктивного падений напряжения, причем вектор омического падения будет противоположен по фазе вектору тока, а вектор индуктивного падения будет отставать от вектора тока

¹⁾ $k_Z = 0,79$ из ур. (68).

на 90° . Величина индуктивного падения напряжения была найдена (ур. (629) равной $13,7\%$ от номинального напряжения при нагрузке номинальным током. Для определения величины омического падения напряжения должно быть подсчитано омическое сопротивление обмотки ¹⁾.

Средняя длина витка равна

$$l_A = 2l_a + 2 \cdot (2 + 2,5) \cdot \tau \dots \dots \dots (653)$$

Коэффициент при τ учитывает удлинение головки обмоток в осевом направлении. Удлинение зависит главным образом от напряжения, для которого машина рассчитана. Соответственно этому меняется коэффициент по мере изменения напряжения (здесь около 2,3). Следовательно

$$l_A = 2l_a + 2 \cdot 2,3 \cdot \tau = 2 \cdot 40 + 2 \cdot 2,3 \cdot 44,9 = 286 \text{ см} = 2,86 \text{ м} \dots \dots \dots (654)$$

Длина обмотки одной фазы равна таким образом [(ур. (615))]:

$$L_A = w \cdot l_A = 205 \cdot 2,86 = 586 \text{ м} \dots \dots \dots (655)$$

Омическое сопротивление одной фазы при 20° С равно (ур. 627):

$$r_A = \frac{0,0175 \cdot L_A}{q_A} = \frac{0,0175 \cdot 586}{104,4} = 0,098 \Omega \dots \dots \dots (656)$$

Омическое падение напряжения в обмотке, нагретой до 95° С (максимальная температура по нормам REM 1923, § 39) при номинальном токе:

$$E_r = I \cdot 1,295 r_A = 302 \cdot 1,295 \cdot 0,098 = 38,3 \text{ вольт}$$

$$\frac{38,3}{\frac{6707}{\sqrt{3}}} = 0,99\% \dots \dots \dots (657)$$

Эта величина настолько незначительна, что ею можно пренебречь.

ЭДС E , найденная из напряжения сети и падений напряжения, может быть разложена (В, § 5) на продольную и поперечную составляющие. Величину ампер-витков якоря здесь следует определить по ур. (531) и (550)

$$\Theta_A = 0,9 \cdot A_1 \cdot \tau = 0,9 \cdot 0,951 \cdot 296 \cdot 44,9 = 11400 \text{ амп.} \dots \dots \dots (658)$$

Ампер-витки необходимые для определения вспомогательной величины E_q° , равны (ур. 572 и 574):

$$k_q \cdot \Theta_A = 0,45 \cdot 11400 = 5130 \text{ амп.} \dots \dots \dots (659)$$

Характеристика воздушного зазора дает для этого случая

$$E_q^\circ = 52\% \dots \dots \dots (660)$$

Затем могут быть определены величины E_i и E_q из фиг. 257. Из полярной диаграммы мы получаем для продольной составляющей значение

$$E_i = 105,3\% \dots \dots \dots (661)$$

Известен также и угол сдвига фаз ϕ между продольной ЭДС и током; этот угол равен

$$\sin \phi = 0,84 \dots \dots \dots (662)$$

Таким образом добавочное возбуждение, которое полюс должен давать для компенсации продольного поля якоря (ур. 566), равно

$$k_i \cdot \Theta_A \cdot \sin \phi = 0,85 \cdot 11\,400 \cdot 0,84 = 8120 \text{ амп.} \quad (663)$$

Из фиг. 205 и 208 может быть определено и возбуждение при номинальном токе. Из частичной характеристики (Φ_{L+z+A}) получаются ампер-витки, необходимые для создания полезного потока (соответствующего продольной ЭДС) в воздушном зазоре, зубцах и теле якоря. Прибавив к этому величину, найденную из ур. (663) для компенсации продольного поля якоря, мы получим магнитное напряжение для путей рассеяния полюсов. Частичная характеристика Φ_s дает соответствующее значение a потока рассеяния. Последний суммируется с полезным потоком и получается общий поток через полюс и ярмо. Магнитное напряжение b , создающее этот поток в полюсе и ярме, получается из частичной характеристики Φ_{m+y} . Величину b складывают с уже найденными частичными ампер-витками. Ампер-витки, необходимые для номинального режима работы, будут следовательно равны

$$\Theta = 21\,200 \text{ амп.} \quad (664)$$

Согласно нормам REM 1923 § 69, обмотка возбуждения должна быть рассчитана с таким запасом, чтобы даже при 25% перегрузке могло быть поддержано номинальное напряжение на зажимах машины. Для этой перегрузки находим, как и выше, величину

$$\Theta_{\max} = 24\,500 \text{ амп.} \quad (665)$$

Обмотки полюсов синхронной машины рассчитываются аналогично машинам постоянного тока.

В рассматриваемой машине взято напряжение возбуждения $U_e = 220$ вольтам. Средняя длина витка подсчитывается из размеров полюсного сердечника

$$l_m = 1,24 \text{ м} \quad (666)$$

Согласно нормам REM 1923, § 39, для однослойных обмоток полюсов из голого провода допускается нагревание в 65°C при температуре окружающей среды в 35°C , следовательно — максимальная температура в 100°C . Отсюда получается удельное сопротивление нагретой меди (ур. 138):

$$\rho = 1,315 \cdot 0,0175 = 0,023 \frac{\Omega \cdot \text{м}}{\text{мм}^2} \quad (667)$$

Все катушки возбуждения соединены последовательно ($a=1$). Тогда для поперечного сечения провода получается (ур. 194):

$$q_e = \rho \cdot \frac{p}{a} \cdot \frac{\Theta_{\max}}{U_e} \cdot l_m = 0,023 \cdot \frac{14}{1} \cdot \frac{24\,500}{220} \cdot 1,24 = 44,5 \text{ мм}^2 \quad (668)$$

Поперечное сечение достаточно велико для выбора однослойной обмотки из голых проводов (В, § 7). Для учета неточностей в конструкции и падения напряжения в подводящих проводах поперечное сечение меди полюсной обмотки берется с запасом в 10%. В рассматриваемой машине было

$$q_e = 1,5 \times 34 = 49,3 \text{ мм}^2 \quad (669)$$

(Действительное поперечное сечение из-за профиля меди, необходимого при сгибании, несколько меньше, чем произведение боковых размеров).

Благодаря хорошему охлаждению обмоток возбуждения при вращающихся полюсах нагрузки могут быть выбраны большими, чем для машин постоянного тока. Средние значения суть:

$$\left. \begin{aligned} a_e &= 2 \text{ амп./мм}^2 \text{ при катушечных обмотках} \\ a_e &= 3 \text{ амп./мм}^2 \text{ при обмотках из голой ленты} \end{aligned} \right\} \dots (670)$$

Эти значения действительны для средних окружных скоростей в $40 \div 50$ м/сек. При больших окружных скоростях могут быть допущены более высокие нагрузки и наоборот.

Для приведенного выше среднего значения плотности тока при обмотках из голой ленты получается ток возбуждения:

$$i_e = q_e \cdot a_e = 49,3 \cdot 3 = 147,9 \text{ амп.} \dots (671)$$

Из ур. (191) мы получаем число витков

$$w_e = \frac{\Theta}{2 \cdot i_e} = \frac{21200}{2 \cdot 147,9} \approx 72 \text{ витка/полюс} \dots (672)$$

Было принято

$$w_e = 71 \text{ виток/полюс,} \dots (673)$$

что соответствует току возбуждения

$$i_e = \frac{\Theta}{2 \cdot w_e} = \frac{21200}{2 \cdot 71} = 149 \text{ амп.} \dots (674)$$

или плотности тока:

$$a_e = \frac{i_e}{q_e} = \frac{149}{49,3} = 3,02 \text{ амп./мм}^2 \dots (675)$$

Суммарная длина провода обмотки возбуждения равна

$$L_e = 2p \cdot w_e \cdot l_m = 28 \cdot 71 \cdot 1,24 = 2460 \text{ м} \dots (676)$$

Сопротивление при 20° C :

$$r_e = \frac{\rho \cdot L_e}{q_e} = \frac{0,0175 \cdot 2460}{49,3} = 0,873 \Omega \dots (677)$$

Максимальный необходимый ток возбуждения равен

$$i_{e_{\max}} = \frac{\Theta_{\max}}{2 \cdot w_e} = \frac{24500}{2 \cdot 71} = 172,5 \text{ амп.} \dots (678)$$

Падение напряжения в нагретых обмотках при этом составляет:

$$e_{e_{\max}} = i_{e_{\max}} \cdot 1,315 \cdot r_e = 172,5 \cdot 1,315 \cdot 0,873 = 198 \text{ вольт} \dots (679)$$

Остается еще около 20 вольт для покрытия падения напряжения в подводящих проводах, а также для запаса.

Как это видно из -фиг. 253, ротор снабжен демпфирующей обмоткой.

Общее поперечное сечение q_D стержней демпфирующей обмотки одного полюса подбирается с таким расчетом, чтобы оно составляло около $30 \div 40\%$ общего поперечного сечения проводов якоря, соответствующих одному полюсному делению.

$$q_D \approx 0,4 \frac{z \cdot q_A}{2p} = 0,4 \cdot \frac{1230 \cdot 104,4}{28} = 1835 \text{ мм}^2 \dots (680)$$

Поперечное сечение обоих колец демпфирующей обмотки обычно принимается равным $0,5 q_D$. Пазовое деление для этой обмотки соответствует пазовому делению статора, пересчитанному на меньший диаметр. В большинстве случаев применяются круглые стержни. В рассматриваемой машине имеется:

$$\text{на полюс} - 6 \text{ стержней } \varnothing = 20 \text{ мм каждый, } q_D = 1884,6 \text{ мм}^2. \quad (681)$$

Это соответствует приблизительно 41% от общего поперечного сечения проводов якоря для одного полюсного деления.

Вес меди.

Вес меди обмотки якоря (ур. 418):

$$G_A = q_A \cdot 3 L_A \cdot \gamma \cdot 10^{-3} = 1,044 \cdot 3 \cdot 58600 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 1630 \text{ кг} \quad (682)$$

Вес меди обмотки возбуждения:

$$G_e = q_e \cdot L_e \cdot \gamma \cdot 10^{-3} = 0,4933 \cdot 246000 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 1080 \text{ кг} \quad (683)$$

Вес меди демпферной обмотки:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Стержни: } q_D \cdot 2p \cdot L_D \cdot \gamma \cdot 10^{-3} = 18,846 \cdot 28 \cdot (40+7) \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 220 \text{ кг} \\ \text{Кольца: } 2 \cdot 0,5 \cdot q_D \cdot \pi \cdot D \cdot \gamma \cdot 10^{-3} = 18,846 \cdot \pi \cdot 400 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 210 \text{ "} \\ \hline G_D = 430 \text{ кг} \end{array} \right\} \quad (684)$$

Потери.

А. Потери в меди и добавочные потери.

Благодаря току нагрузки в машинах переменного тока наряду с потерями в омических сопротивлениях возникают еще и добавочные потери, вызываемые паразитическими полями рассеяния; последние создают в пронизываемых ими металлических массах сильные вихревые токи¹⁾. К этому присоединяются еще и потери из-за полей гармоник в воздушном зазоре (поверхностные потери в полюсных башмаках и зубцах). Добавочные потери не поддаются точному предварительному расчету. В готовых машинах они определяются согласно нормам REM из опыта короткого замыкания; при этом от суммарных потерь при коротком замыкании и при номинальном токе вычитываются потери на трение и нормальные джоулевы потери. (Потерями в железе при коротком замыкании из-за их незначительности можно пренебречь). В качестве приближенного среднего значения добавочных потерь для предварительного подсчета может быть принято значение в 0,6% от номинальной мощности (kVA), приводимое Рюденбергом²⁾ для машин с явными полюсами и с башмаками, собранными из листов. Таким образом добавочные потери равны:

$$V_z = 0,006 \cdot 3500 = 21 \text{ kW} \quad (685)$$

Потери в омическом сопротивлении нагретой обмотки статора составляет (ур. 136):

$$\left. \begin{array}{l} V_A = I^2 \cdot 3 R_A \cdot 10^{-3} = I^2 \cdot 1,295 \cdot 3 \cdot r_A \cdot 10^{-3} = \\ = 302^2 \cdot 1,295 \cdot 3 \cdot 0,098 \cdot 10^{-3} = 34,7 \text{ kW} \end{array} \right\} \quad (686)$$

¹⁾ R. Rüdenberg. Zusätzliche Verluste in Synchronmaschinen und ihre Messung. Elektrot. Ztschr. Heft 3, S. 37, 1924.

²⁾ R. Rüdenberg. Там же, стр. 63.

Согласно нормам, омические потери в обмотках возбуждения должны быть отнесены к обмотке, нагретой до 75°C . Эти потери составляют следовательно:

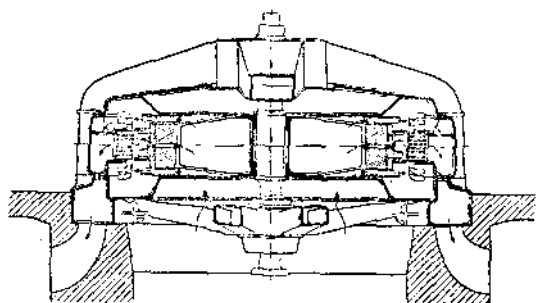
$$V_e = i_e^2 \cdot 1,216 \cdot r_e \cdot 10^{-3} = 149^2 \cdot 1,216 \cdot 0,873 \cdot 10^{-3} = 23,6 \text{ kW} \dots (687)$$

Так как генератор обладает собственной (работающей с ним на одном валу) возбуждательной машиной, то потери последней согласно нормам должны быть причислены к потерям генератора. Если оценить коэффициент полезного действия возбуждательной машины в 87% , то суммарные потери на возбуждение будут составлять:

$$V_e' = \frac{V_e}{0,87} = \frac{23,6}{0,87} = 27,2 \text{ kW} \dots (688)$$

В. Потери в железе.

Согласно нормам, потери в железе определяются из опыта холостого хода, следовательно, для поля при холостом ходе под номинальным напряжением. В действительности эти потери несколько увеличиваются при нагрузке, так как для покрытия внутреннего падения напряжения должна быть создана большая ЭДС под действием более сильного поля. Разница все же будет незначительна¹⁾; поэтому, учитывая большую простоту при измерениях, для определения коэффициента полезного действия приняли значение потерь при холостом ходе.



Фиг. 258. Путь воздуха в генераторе из фиг. 251.

Тело якоря.

Удельные потери в железе (отнесенные к 1 кг железа) составляют согласно ур. (144) для обыкновенного динамного железа, толщиной в 0,5 мм:

$$\begin{aligned} v_A &= \left\{ \left[\frac{f}{100} + \sigma \left(\frac{f}{100} \right)^2 \right] \left(\frac{B_A}{10000} \right)^2 = \right. \\ &= \left. \left[4,4 \cdot \frac{50}{100} + 5,6 \left(\frac{50}{100} \right)^2 \right] \left(\frac{8450}{10000} \right)^2 = 3,6 \cdot 0,845^2 = 2,57 \text{ ватт/кг} \right\} \dots (689) \end{aligned}$$

Вес железа тела якоря составляет согласно ур. 145, измененному соответствующим образом для машины с внутренними полюсами:

$$\begin{aligned} P_A &= \gamma \cdot k_B \cdot \pi \left[\left(\frac{D_a}{2} \right)^2 - \left(\frac{D}{2} + h_z \right)^2 \right] \cdot l_e \cdot 10^{-3} = \\ &= 7,8 \cdot 0,9 \cdot \pi \{ (225)^2 - (200 + 7,7)^2 \} \cdot 34 \cdot 10^{-3} = 5600 \text{ кг} \end{aligned} \dots (690)$$

Таким образом, расчетные потери в железе якоря составляют

$$V_A' = P_A \cdot v_A \cdot 10^{-3} = 5600 \cdot 2,57 \cdot 10^{-3} = 14,4 \text{ kW} \dots (691)$$

Зубцы якоря.

Средние удельные потери (ур. 631):

$$v_z = 3,6 \left(\frac{10800}{10000} \right)^2 = 3,6 \cdot 1,63^2 = 9,56 \text{ ватт/кг} \dots (692)$$

¹⁾ R. Rüdenberg. Там же, стр. 37.

Вес зубцов из ур. (146), видоизмененного для машины с внутренними полюсами:

$$\left. \begin{aligned} P_z &= \gamma \cdot k_B [(D + h_z) \pi - N \cdot b_N] h_z \cdot l_s \cdot 10^{-3} = \\ &= 7,8 \cdot 0,9 [(400 + 7,7) \pi - 210 \cdot 2,3] \cdot 7,7 \cdot 34 \cdot 10^{-3} = 1460 \text{ кг} \end{aligned} \right\} \cdot (693)$$

Таким образом, расчетные потери в железе зубцов:

$$V_z' = P_z \cdot v_z \cdot 10^{-3} = 1460 \cdot 9,56 \cdot 10^{-3} = 13,95 \text{ kW} \dots (694)$$

Благодаря увеличению потерь на вихревые токи из-за обработки материала и из-за отклонения кривой поля от синусоидальной формы, действительные потери в железе будут больше, чем расчетные. Это увеличение потерь в железе учитывается при помощи коэффициента, все же меньшего (около 1,8) чем в машинах постоянного тока, так как отклонение кривой поля от синусоиды в синхронных машинах значительно слабее, чем в машинах постоянного тока. Потери в железе, следовательно, равны:

$$V_{A+z} \approx 1,8 \cdot (V_A' + V_z') = 1,8 (14,4 + 13,95) = 51 \text{ kW} \dots (695)$$

С. Потери на трение различны в зависимости от окружной скорости и размеров машины. В рассматриваемой машине потери на трение и вентиляцию (фиг. 258) составляют около

$$V_R = 45 \text{ kW} \dots (696)$$

Коэффициент полезного действия определяется из ур. (152). Сумма отдельных потерь равна:

Потери в меди статора (ур. 686)	34,7 kW	}	(697)
Добавочные потери ур. (685)	21,0 "		
Потери на возбуждение (ур. 687)	23,6 "		
Потери в железе (ур. 695)	51,0 "		
Потери на трение и вентиляцию (ур. 696)	45,0 "		
Общие потери.		175,3 kW	

Отдаваемая активная мощность при $\cos \varphi = 0,8$ составляет:

$$3500 \cdot 0,8 = 2800 \text{ kW}.$$

Таким образом, коэффициент полезного действия, согласно ур. (152), равен

$$\eta = \frac{N}{N + V} = \frac{2800}{2800 + 175,3} = 94,1\% \dots (698)$$

ЧАСТЬ II.

ТРАНСФОРМАТОРЫ И АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ.

Инж. Герхард Реерник (Gerhard Reernik), Берлин.

Исторический обзор.

Открытие электродинамического принципа и опыт, приобретенный в построении и расчете электрических машин, дали возможность приступить к проектированию машин для больших мощностей. Потребность в больших количествах электрической энергии появилась благодаря усовершенствованию дуговой лампы и лампы накаливания. Первая силовая установка возникла в 1879 г. в Берлине; она служила для освещения одного пассажа Королевской галереи (Kaisergalerie) и восточного вокзала при помощи дифференциальных дуговых ламп ¹⁾.

Спустя три года была построена в Нью-Йорке большая силовая станция, служившая для питания 7000 ламп накаливания.

Для целей освещения можно применять как постоянный ток, так и переменный; для этого необходимо лишь, чтобы число периодов переменного тока было достаточно велико и чтобы, следовательно, нить накала лампы не оказалась чувствительной к периодичности тока.

Вопрос о наиболее экономичной и технически наиболее благоприятной системе тока занимал электротехников вплоть до XX столетия.

Нагрузка осветительной центральной станции сильно колеблется; максимальная сила тока употребляется для освещения только вечером. Поэтому стали уделять большое внимание аккумуляторной способности постоянного тока. При применении аккумуляторов малые нагрузки могут восприниматься только ими одними, а нагрузочные пики могут покрываться совместно с машинами. Благодаря этому машины не всегда должны находиться в работе и не должны быть рассчитаны на максимальные пики нагрузки. Изобретение трехпроводной системы Вильгельмом Сименсом (Wilhelm Siemens) и Гопкинсоном (Hopkinson) дало возможность выигрывать на меди и увеличивать экономичность распределительных сетей постоянного тока.

Кроме того, генератор постоянного тока можно было с хорошим коэффициентом полезного действия пустить и в качестве двигателя; генераторы переменного тока, однако, не поддавались пуску в ход без постороннего привода и не могли, следовательно, работать двигателями. Все это способствовало тому, что в первые годы развития техники сильных токов применялся почти исключительно постоянный ток.

¹⁾ A. Roth. Entwicklung der Starkstromtechnik in ihren Hauptzügen. Selbstverlag der Siemens-Schuckert-Werke.

Недостатки и ограниченность действия установки постоянного тока стали все же выявляться все отчетливее. Лампы накаливания могут быть построены только для низкого напряжения; для распределительной сети требуются поэтому провода экономически невыгодного большого сечения, или же высокие потери в проводах вызывают чрезмерные нагревания. Питание широко разветвленной сети постоянного тока одной силовой установкой становится вообще невозможным.

Марсель Депрэ (Marcel Deprez) сделал попытку построить экономичную передачу путем увеличения напряжения постоянного тока. На электротехнической выставке в Мюнхене в 1882 г. предполагалось устройство силовой установки. В Мисбах (57 км от Мюнхена) были установлены два генератора высокого напряжения, по 2 kW и 2000 вольт каждый, которые приводились в движение водяными турбинами. Попытка передать мощность при помощи телеграфного провода окончилась неудачей, так как после кратковременной работы обнаружилась недостаточность изоляции машины. Возможность получить постоянный ток высокого напряжения ограничена и в настоящее время, так как, благодаря слишком большой разности напряжений между каждой парой соседних коллекторных пластин, возникает вольтова дуга, т.е. „круговой огонь“, на окружности коллектора. Самый крупный недостаток заключается в том, что высокое напряжение постоянного тока может быть преобразовано в напряжение, необходимое на месте потребления, только при помощи вращающихся машин. Преимущества от применения аккумуляторов уравниваются их недостатками; из них главными являются плохой коэффициент полезного действия (75%), высокая стоимость и большая деликатность.

Экономическая необходимость доставлять потребителю киловатт-час по возможно меньшей цене ведет к производству электрической энергии в таких местах, где энергия для приведения в действие машин дешева, и к установке возможно более крупных машинных единиц. Единовременные и эксплуатационные расходы, а также и потери при производстве одного киловатт-часа становятся тем меньше, чем большими выбраны машины. Возрастающая централизация производства электрической энергии предполагает однако, что энергия передается на большие расстояния и по сильно разветвленным сетям. Развитие электрического хозяйства в этом направлении оказалось возможным только при применении переменного тока, в особенности трехфазного.

Закон индукции — этот основной закон для явлений переменного тока — был дан Фарадеем еще в 1831 г. Катушка Румкорфа (Ruhmkorff)¹⁾ являлась применением этого закона. Так как в ней изменение потока в открытой магнитной цепи покоится на размыкании тока, то ее можно рассматривать лишь как предшественницу трансформатора. Депрэ (Deprez) и Карпантье (Carpentier) в 1881 г. первые убедились в преимуществах передачи высокого напряжения при помощи переменного тока. Согласно их английскому патенту, преобразование напряжения осуществлялось на месте производства энергии и у потребителя при помощи индукционных катушек. Первые применения трансформаторов в сетях переменного тока (Jarlochhoff, Gaulard и Gibbs) еще не служили для создания сети высокого напряжения и страдали тем, что трансформаторы были соединены в цепи машины последовательно, благодаря чему один нарушал работу другого. Изобретение Дэри (Déri) в 1885 г., заключавшееся в параллельном соединении трансформаторов с первичной стороны, дало правильное решение вопроса. По предложению фирмы Ганц и К^о (Ganz и С^о) Дэри, Блати

¹⁾ L. Schüler. Die Geschichte des Transformators. ETZ, 1917.

и Циперновский (Déri, Blathy, Zipernowsky) выполнили первые трансформаторные установки, вполне удовлетворявшие практическим нуждам.

В том же году Ферранти в Англии (Ferranti) заявил патент на параллельное соединение, найденное им независимо от Дэри. Параллельным соединением с первичной стороны достигается то, что у зажимов каждого трансформатора даже и при различных нагрузках сохраняется одно и то же напряжение, если пренебречь небольшими падениями напряжения в соединительных проводах между трансформаторами.

Первые трансформаторы фирмы Ганц и К^о были кольцевыми. Вокруг замкнутого кольца из окисленной или тонко изолированной железной проволоки была намотана, так же как и в современных трансформаторах с кернами, первичная и вторичная обмотки. Было построено также нечто вроде трансформатора броневого типа; при этом обе катушки образовывали внутреннее кольцо, а обмотанная вокруг них железная проволока представляла наружную броню. Изготовление таких трансформаторов с замкнутой железной цепью, представлявших собою благоприятную в магнитном отношении конструкцию, пришлось в дальнейшем прекратить, так как для фабричного изготовления нанесение катушек на железо здесь слишком сложно. Также и изоляцию катушек не так легко выполнить, как в том случае, если каждая из них изготовлена отдельно.

Современные трансформаторы состоят обычно из железного сердечника, собранного из листов легированного железа. Между кернами сердечника, на которых насажены катушки, и ярмом, замыкающим цепь железа, образуется стыковой зазор, который должен быть возможно меньшим. Для лучшей изоляции и более удовлетворительного отведения тепла железный сердечник с катушками погружается в кожух с маслом; исключение составляют лишь трансформаторы малой мощности.

С появлением трансформатора на стороне переменного тока оказался перевес над постоянным током. Благодаря переменному току, мощной силовой установке может быть обеспечен достаточно большой район питания и при том относительно просто и с хорошим коэффициентом полезного действия. Одновременно с фирмой Ганц и К^о построением трансформаторов и выполнением силовых установок в широком масштабе занимались и другие фирмы в Англии, Америке и Германии. В 1886 г. в Риме была оборудована силовая установка на 1500 kW, в Англии — на 800 kW. Благодаря наличию и других областей применения трансформаторов в качестве измерительных, пусковых трансформаторов, делителей напряжения, дроссельных катушек и т. д. трансформаторостроение стало обширной самостоятельной отраслью электромашиностроения. Теоретические работы Каппа, Штейнметца, Видмара и др., давшие богатый материал для понимания рабочих процессов для расчета и выбора размеров трансформатора, не могут быть рассмотрены в узких рамках данной главы. История трансформатора дает краткий обзор этих работ.

После изобретения трансформатора и по мере роста значения переменного тока производились многочисленные работы над проблемами цепи переменного тока. Прежде всего необходимо было создать двигатель для переменного тока. Силовая установка, служащая только для целей освещения, используется лишь в продолжение незначительной части суток, если же кроме того приводить в действие и машины, то использование установки значительно улучшается.

Э. Томсон (Elihu Thomson) наблюдал действие магнитов переменного тока на диски и пытался объяснить возникавшее здесь вращение, имеющее

теперь практическое применение в счетчиках. Итальянец Феррарис (Ferraris) в 1885 г. нашел, что два переменных тока, не совпадающих во времени своими амплитудами, должны создать вращающееся поле. Для доказательства вращающегося поля он пользовался двумя накрест расположенными катушками, питаемыми токами, сдвинутыми во времени. Сдвиг фаз он получал последовательным включением катушки самоиндукции в одну из указанных выше катушек. Ему удалось показать вращающееся поле на примере вращения медного цилиндра. Этим самым были найдены основные черты принципа действия однофазного индукционного двигателя, хотя сам Феррарис и не помышлял о практическом применении этого принципа. Первый двигатель, вращавшийся по принципу вращающегося поля и приводившийся в движение двухфазным током, был построен Тесла (Tesla), открывшим независимо от Феррариса принцип вращающегося поля. Он применял для двигателя, построенного фирмой Вестингауз, четырехполюсный остоу, через противоположные полюса которого пропускался ток той же фазы. На роторе имелись две короткозамкнутые катушки.

Эти моторы не приобрели особого значения и были вытеснены трехфазным асинхронным или индукционным двигателем.

Лишь после открытия асинхронного двигателя переменный ток получил сильное распространение. Во время опытов над торможением при помощи короткого замыкания двигателей постоянного тока Доливо-Добровольскому (Dolivo-Dobrowolsky) пришла мысль использовать усилия магнитного поля на коротко-замкнутую цепь, утопленную в пазах железа. Его рассуждения привели к выводу, что трехфазные токи, амплитуды которых сдвинуты относительно друг друга во времени на 120° , создают равномерное вращающееся поле. Он также утверждал, что ротор с короткозамкнутой обмоткой, индуктируемой таким вращающимся полем, должен вращаться в пространстве с небольшим лишь отклонением от скорости вращения поля. Отсутствие необходимости в громоздком, дорогом коллекторе машины постоянного тока, требовавшем к тому же постоянного ухода и таившем в себе возможности всяких повреждений, способствовало быстрому распространению асинхронного двигателя в особенности для тяжелых случаев эксплуатации.

В 1889 г. Доливо-Добровольский запатентовал наиболее простой из известных в электротехнике двигателей, а именно асинхронный двигатель с коротко-замкнутым ротором. До сих пор ограничиваются применением коротко-замкнутого ротора, главным образом, для небольших двигателей. В значительной же части асинхронных двигателей предусматривается ротор с контактными кольцами; простой и удобный пуск такого ротора способствовал его быстрому распространению. Регулировка числа оборотов и улучшение пускового момента асинхронного двигателя при помощи сопротивлений, включенных через контактные кольца в цепь ротора, были осуществлены в первых двигателях, построенных фирмой АЕГ по указаниям Доливо-Добровольского.

Конструкция первых двигателей ничем существенным не отличается от конструкции современных двигателей и ни в какой мере не отражает того многообразия, которое наблюдалось в годы развития машин постоянного тока и генераторов переменного тока. Знание законов электрической и магнитной цепей диктовало однозначное решение вопроса и наиболее благоприятные формы двигателя. Для суждения о свойствах индукционных двигателей в эксплуатации очень существенной оказалась

1) M. Dolivo-Dobrowolsky, Aus der Geschichte des Drehstroms. ETZ, 1917.

круговая диаграмма, найденная из опытных данных Гейландом ¹⁾. Оссана (Ossana) дал точное объяснение этой круговой диаграммы. Если асинхронный двигатель приводится во вращение со скоростью большей, чем скорость вращения поля (гиперсинхронизм), то он будет отдавать электрическую мощность как генератор.

Первая передача трехфазного тока была осуществлена на Международной электротехнической выставке в Франкфурте на Майне в 1891 г. О. Миллер (Miller) был техническим руководителем выставки.

Эта первая установка являлась доказательством значительного преимущества передачи энергии переменным током.

Передача на 175 км из Лауффена на Некаре во Франкфурт под напряжением в 25 000 вольт работала с коэффициентом полезного действия в 75%. Установка была выполнена фирмой AEG и машинной фабрикой Эрликон (Oerlikon). В Лауффене был установлен генератор трехфазного тока в 220 kW для 50 вольт и приводился в движение при помощи водяной турбины. При помощи масляных трансформаторов напряжение могло трансформироваться до 15 000 вольт, а для опытных целей и до 25 000 вольт.

На выставке асинхронный двигатель в 75 kW приводил в движение насос, поднимавший воду для искусственного водопада, что наглядно показывало мощность двигателя. Кроме того, производилось питание мелких асинхронных двигателей и около 1000 ламп накаливания. После выставки установка в Лауффене была использована для подачи энергии в Гейльбронн (Heilbronn).

Этим успехом нельзя было ограничиться; вскоре появился еще ряд установок. Фирма Сименс и Гальске построила в 1893 г. в Зодене, в Таупусе районную центральную станцию трехфазного тока, питавшую семь селений.

С этого времени трехфазный ток завоевывает почти всю область больших центральных станций.

От последних по всем направлениям разветвляется по мачтам трехфазная сеть высокого напряжения и покрывает потребность в электрической энергии в окружающих городах, промышленных и кустарных предприятиях, а также в сельском хозяйстве.

Недостаток трансформаторов и асинхронных двигателей заключается в том, что для преобразования энергии здесь требуются магнитные поля. При этом невозможно избежать возникновения нежелательных полей рассеяния, что вынудило прибегнуть к самым разнообразным вспомогательным мерам. Даже в том случае, если энергия, потребная для образования полей, является потерей лишь в незначительной своей части, а в главной части с уменьшением потока отдается обратно в замкнутую цепь, — неизбежным следствием явятся увеличенная нагрузка и потери. Для больших установок можно в среднем принять $\cos \varphi = 0,7$, т.-е. безваттная или холостая мощность будет равна по величине полезной или активной мощности. Улучшение коэффициента мощности можно осуществить или при помощи конденсаторов или при помощи машин, работающих с емкостными токами. В Германии конденсаторы имеют малое применения, в других странах — несколько большее. Недостаток конденсаторов выражается в том, что они получают очень дорогие, если желательна компенсация больших реактивных мощностей; кроме того, они увеличивают опасность от перенапряжений в сети. Машин, отдающие реактивную мощность, всегда нуждаются в коллекторе или в соединении с машиной, обладающей коллектором.

¹⁾ A. Heyland. Eine Methode zu experimentelle Untersuchungen an Induktionsmotoren. Verlag Ferd. Enke, Stuttgart, 1902.

Англичанин Свинбёрн (Swinburne) в 1889 г. первый выяснил, что реактивная мощность трансформаторов должна компенсироваться конденсаторами или перевозбужденными синхронными двигателями и что увеличение воздушного зазора трансформатора ведет к увеличению энергии поля, однако без возрастания потерь на перемагничивание. Синхронизированный асинхронный двигатель в последнее время стал излюбленным приводным двигателем, так как в качестве синхронного двигателя он обладает высоким пусковым моментом, при нормальном числе оборотов автоматически синхронизируется после включения возбуждения и выпадает из синхронизма при перегрузках, в качестве же асинхронного двигателя он может покрывать высокие токи нагрузки. При недогрузке и при холостом ходе машина отдает реактивную мощность, как синхронная машина. Синхронизированный асинхронный двигатель был описан Даниэльсоном в 1901 г.¹⁾ и строится теперь для всех мощностей. Улучшение коэффициента мощности при помощи синхронных машин также давно известно, однако в широком масштабе стало применяться лишь после войны. Первый компенсированный трехфазный двигатель был предложен Гейландом²⁾. Двигатель Осноса³⁾, так же как и двигатель Гейланда, при малых мощностях является компенсированной машиной, отдающей при малой нагрузке реактивную мощность в сеть. При больших мощностях отдельно от асинхронной машины или также на одном валу с нею устанавливаются трехфазные возбудительные машины. Если довольствуются улучшением $\cos \phi$ до единицы и если машина большей частью полностью нагружена, то вполне достаточно обыкновенная трехфазная возбудительная машина с собственным возбуждением, запатентованная Блонделем (Blondel) в 1903 г. Если однако желательна компенсация также и при уменьшенной нагрузке и отдача безваттной мощности при холостом ходе, то применяют трехфазную возбудительную машину с посторонним возбуждением. Они были изобретены Лебланом (Leblanc) и Шербиусом (Scherbius) в одно и то же время, что и машины с собственным возбуждением. В годы после войны фирмы Сименс Шуккерт и Броун-Бовери настолько усовершенствовали эти машины, что их стали применять для асинхронных машин большой мощности (наибольшая мощность — 17 500 kVA).

Второй недостаток асинхронных двигателей — невозможность регулировки числа оборотов без потерь — вызвал к жизни ряд различных решений. При регулировке числа оборотов обыкновенного асинхронного двигателя часть его мощности должна уничтожаться в сопротивлениях цепи ротора. Этот расход мощности будет тем значительнее, чем больше число оборотов ротора отличается от числа оборотов вращающегося поля статора. Такая регулировка проста, но неэкономична. Переключением полюсов можно получить еще одну ступень для чисел оборотов, при которой машина может быть хорошо использована без потери мощности. Точно также при соединении в каскад двух асинхронных двигателей можно получить три различные ступени чисел оборотов, а при переключении полюсов второй машины можно добиться и четырех ступеней; такая регулировка не связана с потерей мощности.

При больших мощностях регулировку числа оборотов асинхронных двигателей без потерь лучше всего производить при помощи регулировочных агрегатов. Потеря мощности асинхронного двигателя или воз-

¹⁾ Danielson, ETZ, 1901.

²⁾ A. Heyland, ETZ, 1901, 1902.

³⁾ M. Osnos, ETZ, 1902.

вращается его валу от механически соединенного с ним агрегата [патент фирмы Фельтен-Гильом-Ламейер (Felten-Guilleaume-Lahmeyer) в 1905 г.], или же отдается обратно в сеть от электрически соединенного агрегата (патент Шербиуса, 1905 г.) после преобразования числа оборотов. В регулировочных агрегатах постоянного тока или в агрегатах Кремера (Kremer) теряемая мощность с низким числом периодов преобразовывается одноякорным преобразователем в постоянный ток и возвращается валу главного двигателя при помощи механически связанной с последним машиной постоянного тока. Вместо двигателя постоянного тока можно электрически или механически присоединить трехфазную коллекторную машину. Регулировочные агрегаты с электрическим или механическим соединением, построенные фирмой Сименс-Шуккерт, могут регулировать число оборотов выше и ниже синхронного. При такой регулировке числа оборотов дорогие вспомогательные машины получают чрезвычайно малыми. При помощи последних можно просто увязать главную цель — регулировку числа оборотов — с компенсацией главной машины до $\cos \varphi = 1$.

Регулировочные агрегаты с асинхронным двигателем в качестве главной машины имеют преимущества только в крупных установках. Если желательно получить возможность регулировки в широких пределах при удовлетворительном коэффициенте полезного действия также и для малых мощностей, то следует пользоваться коллекторными двигателями. Первые трехфазные коллекторные двигатели для шунтового и серийного соединения были предложены Гергесом (Görges) в 1890 г.¹⁾, однако в различных видах их стала строить первой фирма Сименс-Шуккерт в 1908 г.

Трехфазные коллекторные двигатели не связаны условиями синхронизма, как синхронные и асинхронные машины. Коллекторным двигателям можно дать любые характеристики чисел оборотов, для чего изменяют или напряжение, подводимое к коллектору, или же положение щеток на последнем. В шунтовых коллекторных машинах многофазного тока число оборотов установленное однажды, сохраняется почти неизменным при всех нагрузках. Эти двигатели пригодны для вращения машин, требующих тонкую регулировку. Упомянутые выше двигатели Гейланда и Осноса являются трехфазными шунтовыми двигателями, работающими как асинхронные двигатели близко к синхронизму, при чем регулировке их числа оборотов не придавалось никакого значения. Так как в этих двигателях через коллектор передается только реактивная мощность, то он получается относительно небольших размеров. Серийные коллекторные двигатели трехфазного тока играют большую роль, чем шунтовые коллекторные двигатели, могущие в большинстве случаев быть замененными значительно более простым асинхронным двигателем, имеющим также шунтовую характеристику. Для подъемных и тяговых двигателей гораздо более пригодна серийная характеристика, так как в этих двигателях число оборотов меняется с нагрузкой. Они пригодны также для приведения в действие прядильных машин, компрессоров и вентиляторов и при видоизмененной схеме являются вспомогательной машиной в упомянутых механически и электрически соединенных агрегатах. Репульсионный двигатель многофазного тока имеет ту же характеристику числа оборотов, что и нормальный трехфазный синхронный двигатель. Поэтому нет никаких оснований его применять. Также и в видоизмененной схеме по Гейланду²⁾, где путем применения

¹⁾ Görges. ETZ, 1891.

²⁾ A. Heyland. ETZ, 1914.

особых обмоток достигается возможность регулировки числа оборотов, этот двигатель не нашел себе практического применения.

Однофазные коллекторные двигатели переменного тока в сравнении с однофазными индукционными двигателями играют большую роль, чем многофазные коллекторные двигатели в сравнении с трехфазным асинхронным двигателем, так как однофазный индукционный двигатель неудовлетворителен при пуске и имеет большие размеры, чем трехфазный двигатель той же мощности. Если желательно получить в однофазном шунтовом двигателе регулировку числа оборотов, то этого можно достигнуть только усложнением схемы. Однофазные шунтовые двигатели строятся поэтому редко. Однофазный же серийный двигатель имеет очень большое значение, так как он более прост по своей схеме. Он находит себе применение главным образом как тяговый двигатель. В трамваях, подземных и пригородных дорогах постоянный ток оказался весьма экономичным. Однако в дорогах дальнего следования, где приходится ставить вопрос о высоком напряжении и переменном токе, предпочтительнее пользоваться однофазным током благодаря простоте контактной сети. Однофазный серийный двигатель был усовершенствован в 1904 г. Бэн-Эшенбургом (Behn-Eschenburg) и Р. Рихтером (R. Richter) для работы в качестве тягового двигателя. Стали применять для легких железнодорожных профилей и репульсионный двигатель однофазного переменного тока. Однофазный репульсионный двигатель Томсона более раннего происхождения, чем трехфазный двигатель, и применялся в Америке уже в 1886 г.¹⁾ В нормальном виде он имеет характеристику серийного двигателя, однако, замкнув в нем накоротко обмотку ротора, этот двигатель может быть превращен в асинхронный. Наряду с хорошим коэффициентом полезного действия и коэффициентом мощности не на много худшем, чем у трехфазного асинхронного двигателя, однофазный репульсионный двигатель отличается простотой схемы и может быть присоединен к сети под любым напряжением, так как цепь ротора в нем совершенно не зависит от цепи статора. Он пригоден почти для всех работ. Коллекторные машины в качестве генераторов до сих пор не применяются.

Для выполнения машин, трансформаторов, приспособлений для пуска и управления и т. п. отдельные комиссии Союза германских электротехников (VDE) разработали нормы, обязательные в пределах Германии, опубликованные в ETZ за 1922 г. и вступившие в силу с января 1923 г. „Правила для оценки и испытания трансформаторов“ (сокращенно—RET 23) служат для трансформаторостроения, а „Правила для оценки и испытания электрических машин“ (REM 23) являются руководящими правилами для электромашиностроения.

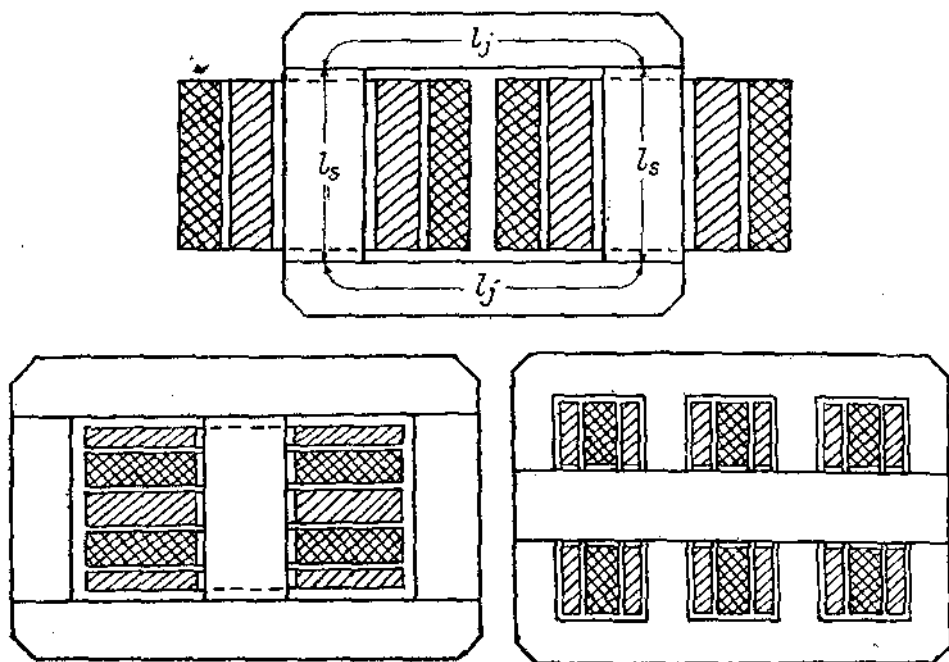
А. Трансформатор.

§ 1. Общие сведения и конструкция.

В трансформаторе электрическая энергия преобразуется без механических перемещений, следовательно, без изменения числа периодов. Передача энергии осуществляется путем воздействия двух замкнутых электрических контуров, в большинстве случаев в электрическом отношении независимых друг от друга, на одну и ту же магнитную цепь. К одному из замкнутых контуров энергия магнитной цепи должна подводиться в виде реактивной мощности.

¹⁾ Dr. Schenk el. Die Kommutatormaschine für einphasigen und mehrphasigen Wechselstrom. Verlag. Walter de Gruiter u. C^o, 1924.

Имеются два главных типа конструкций трансформатора — это стержневой (фиг. 259а) и броневой трансформаторы (фиг. 259б и с). Стержневой трансформатор с простым сердечником является наиболее часто встречающейся конструкцией и при одинаковой мощности требует больше меди, чем броневой трансформатор, тогда как последний требует больше железа. Железному сердечнику трехфазного трансформатора можно придать такую же форму, как и однофазному броневому трансформатору (фиг. 259б); в этом случае все керны, на которых равномерно распределены обмотки трех фаз, имеют одинаковые сечения. Такой трансформатор будет стержневым, так как железо здесь не охватывает катушки односторонне. Броневой трансформатор для трехфазного тока представлен на фиг. 259с.



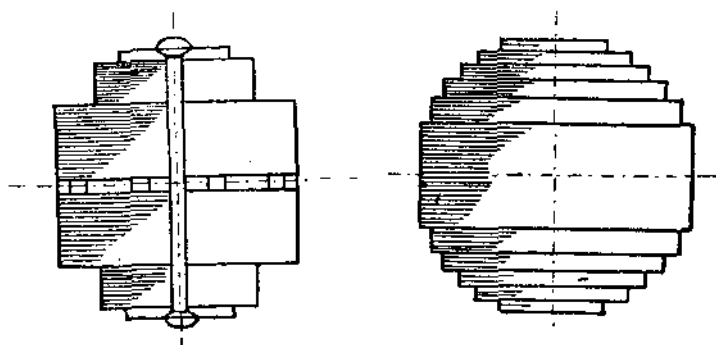
Фиг. 259. Трансформаторы: а) однофазный стержневой трансформатор с цилиндрическими катушками; б) однофазный броневой трансформатор с дисковыми катушками, с) трехфазный броневой трансформатор.

Сердечник трансформатора собирается из листов легированного железа, толщиной от 0,3 до 0,5 мм. Для уменьшения потерь на вихревые токи листы изолируются между собою шелковистой бумагой или изоляционным лаком. Листы, которым придается возможно более простая форма, сжимаются нажимными плитами и скрепляются заклепками или болтами. Листы одного пакета прикрепляются к листам другого пакета или „в нахлестку“ или „в стык“. На ряду с кернами квадратного и прямоугольного сечений применяются керны также крестообразной и круглой формы (фиг. 260). Толстые пакеты железа для лучшего охлаждения делятся на части воздушными промежутками.

Обмотки выполняются или в виде цилиндрических катушек (фиг. 259а), или в виде дисковых катушек (фиг. 259б и с). Так как катушка низкого напряжения может быть изолирована слабее, то ее помещают ближе к железу. Таким образом при цилиндрических обмотках катушка низкого

напряжения будет расположена внутри, катушка же высокого напряжения — снаружи. В дисковой обмотке, более благоприятной в отношении рассеяния и охлаждения, катушки делятся на несколько частей. В качестве наружной катушки берут большей частью катушку низкого напряжения с числом витков, равным половине числа витков средней катушки.

Существенную роль играет охлаждение, так как размеры трансформатора определяются из допустимого превышения температуры, установленного правилами (RET 23). Трансформаторы малой мощности строятся в виде сухих трансформаторов. Если отведение тепла путем естественного излучения является затруднительным, то его можно улучшить искусствен-



Фиг. 260. Формы поперечных сечений сердечника.

ной вентиляцией помещения, охлаждением вентиляторами, а также и водой. При высоких напряжениях и больших мощностях лучшей конструкцией является трансформатор с масляным охлаждением благодаря его хорошей изоляции и лучшего отведения тепла. Вместо естественного отведения тепла от стенок кожуха, поверхность которого искусственно увеличивается применением волнистого железа или охлаждающих ребер, можно, в свою очередь ввести искусственное охлаждение кожуха. Различные виды постороннего охлаждения суть: вентиляция трансформаторного помещения естественной тягой, увеличение поверхности трансформаторного кожуха, устройство внутри кожуха змеевиков для водяного охлаждения и, наконец, охлаждение масла вне трансформатора. В мощных трансформаторах масло в кожухе часто приводится искусственно в движение.

§ 2. Магнитный поток.

Исходной точкой для построения векторной диаграммы времени — этой основной диаграммы трансформатора — является суммарный, полезный поток, пронизывающий в одинаковой мере первичную и вторичную обмотки. За первичную обмотку принимают ту, которая воспринимает электрическую энергию из сети и преобразует ее в магнитную энергию. Во вторичной обмотке магнитная энергия снова преобразуется в электрическую.

Пусть поток меняется синусоидально во времени. После установления масштаба его можно, следовательно, представить в виде вектора. Число периодов f в секунду определяется из угловой скорости ω , с которой вектор вращается вокруг своей начальной точки:

$$\omega = 2\pi f \cdot \frac{1}{\text{сек}} \dots \dots \dots (1)$$

Длительности полного периода $T = \frac{1}{f}$ сек. соответствует поворот вектора на 360° . Если поместить начальную точку вектора в начало координатной системы, то проекция вектора на ось X будет представлять мгновенное значение. Последнее будет положительным, если оно будет направлено в положительную сторону оси абсцисс, и наоборот. За положительное направление вращения вектора примем направление против часовой стрелки.

Пусть поток Φ в момент $t = 0$, т.-е. в момент, когда он совпадает с положительным направлением оси абсцисс, имеет свое максимальное значение Φ_g . Мгновенное значение потока равно

$$\Phi = \Phi_g \cdot \cos \omega t \text{ максвелл} \dots \dots \dots (2)$$

Направление потока в пространстве будет зависеть от направления создающего его тока и от направления витков обмотки. Обмотка с правым ходом, число витков которой при расчетах следует принимать за положительное¹⁾, создает поток, который, согласно правилу пловца (правило Ампера), имеет одинаковый знак с током. В левоходовой обмотке, наоборот, направления тока и магнитного потока противоположны друг другу. Во всех уравнениях мы будем рассматривать только правоходовые обмотки с положительным числом витков, т.-е., следовательно, обмотки, при которых направления, тока и магнитного потока будут в любой момент одинаковы. Такие обмотки получили теперь всеобщее распространение.

Величина суммарного потока Φ_g зависит от максимальной плотности индукционных линий (индукции) B в гауссах, выбранной для единицы поверхности, и от активного поперечного сечения железа Q в см^2 :

$$\Phi_g = B \cdot Q \text{ максвелл} \dots \dots \dots (3)$$

Выбор величины индукции является делом опыта и зависит от назначения, от применяемого сорта железа и от числа периодов, о чем будет сказано в § 11 этой главы. В электромашиностроении можно отказаться от рассмотрения точного распределения индукции по поперечному сечению и считать, что индукционные линии распределяются с равномерной плотностью и что они перпендикулярны к поперечному сечению.

Согласно закону Максвелла, электрическим эквивалентом суммарного потока является одинаковый с ним по фазе намагничивающий ток J_m , так как суммарный поток

$$\Phi_g = \frac{\frac{4\pi}{10} \cdot w \cdot \sqrt{2} \cdot J_m}{\frac{l_m}{\mu \cdot Q}} \text{ максвелл} \dots \dots \dots (4)$$

пропорционален магнитодвижущей силе

$$M_m = \frac{4\pi}{10} \cdot w \cdot \sqrt{2} \cdot J_m \text{ амп.,} \dots \dots \dots (5)$$

где w — число витков и J_m — эффективное значение намагничивающего тока. Магнитному же сопротивлению $\frac{l_m}{\mu \cdot Q}$ поток будет обратно пропорционален. Здесь l_m — средняя длина индукционной линии в см и μ — магнитная проницаемость всей цепи железа, имеющей поперечное сечение $Q \text{ см}^2$.

¹⁾ Bloch. Die Ortskurven der Graphischen Wechselstromtechnik. Verlag Roscher u. Co. Zürich, 1924.

§ 3. Ток холостого хода.

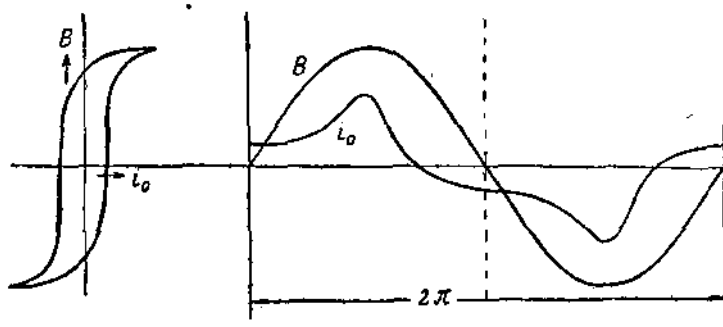
Ток холостого хода J_0 является результирующей от намагничивающего тока J_m , возникающего одновременно с равным ему по фазе суммарным потоком, и от весьма незначительного тока J_w , покрывающего потери в железе магнитной цепи. Векторный характер величин мы в дальнейшем будем отмечать точкой над соответствующим обозначением; таким образом:

$$\dot{J}_0 = \dot{J}_m + \dot{J}_w \text{ амп.} \quad (6)$$

Так как составляющие тока холостого хода перпендикулярны одна другой, то можно написать:

$$J_0 = \sqrt{J_m^2 + J_w^2} \approx J_m \text{ амп.} \quad (7)$$

Угол между намагничивающим током и током холостого хода называется гистерезисным углом сдвига фаз φ_h .



Фиг. 261. Ток холостого хода.

Для подсчета тока холостого хода необходимо определить в отдельности его составляющие. Из-за разницы в поперечных сечениях железа магнитной цепи индукции в железе будут различны. Для подсчета намагничивающего тока достаточно рассмотреть отдельные сечения железа, а именно: сечение керна Q_k , ярма Q_j и воздуха Q_v . Из ур. (3) могут быть определены индукции для этих сечений, если определена индукция в одном сечении.

Из кривой намагничивания для применяемого сорта железа получаются максимальные напряженности поля H , соответствующие подсчитанным индукциям:

$$B = \mu \cdot H \cdot \text{гауссов} \quad (8)$$

Магнитодвижущая сила намагничивания (ур. 5) пропорциональна линейному интегралу напряженности поля вдоль средней индукционной линии. Длина этой индукционной линии состоит соответственно сечениям из отдельных частей, а именно: в керне l_k , в ярме l_j и в стыке δ . МДС трансформатора на фиг. 259а находят из уравнения:

$$M_m = \frac{4\pi}{10} \cdot w \cdot \sqrt{2} \cdot J_m = \int H \cdot dl = H_k \cdot 2 \cdot l_k + H_j \cdot 2 \cdot l_j + H \cdot 4 \cdot \delta \text{ амп.} \quad (9)$$

При синусоидальном изменении потока и индукций изменение поля и намагничивающего тока при больших насыщениях железа перестанет быть синусоидальным; кривая поля и силы тока будут иметь заостренную форму.

Активная составляющая сила холостого хода покрывает потери на гистерезис и на вихревые токи. Для самых употребительных сортов железа потери 1 кг получаются из эмпирических кривых ¹⁾ или по формуле Штейнметца (Steinmetz) ²⁾, при чем в последнюю при высоких индукциях вносится поправка.

Если петля гистерезиса известна, то при ее помощи можно построить по точкам изменения во времени тока холостого хода. Для синусоидальной кривой потока и индукции на фиг. 261 представлено в преувеличенном виде изменение этого тока. В качестве периодической функции ток можно разложить в ряд Фурье на намагничивающий ток, совпадающий по фазе с потоком, и на активный ток, опережающий поток на 90°. Наряду с этими основными гармониками, имеющими то же число периодов, что и поток, выделяется прежде всего высшая третья гармоника. Эта гармоника выступает резко всего при индукциях около 15 000 гауссов ³⁾. В трансформаторах большой мощности с числом периодов, непригодным для целей освещения, оказалось возможным, после введения добавочной обмотки, использовать для этих целей третьи гармоники, при работе с малой мощностью.

Предварительный подсчет тока холостого хода связан с возможностью больших погрешностей, так как качество железа и величина стыковых зазоров оказывают на него сильное влияние.

§ 4. Векторная диаграмма трансформатора.

В диаграмме времени все векторы имеют одно и то же число периодов, а следовательно, и угловую скорость. Так как максимальные значения наступают не одновременно, то векторы остаются сдвинутыми друг относительно друга на определенные углы, которые нас прежде всего и интересуют. Отстающим по фазе считается вектор, сдвинутый относительно другого по направлению часовой стрелки. В электрической цепи доступны измерению эффективные значения токов и напряжений. Однако эффективное значение является квадратичным средним значением и составляет $\frac{1}{\sqrt{2}}$ часть от максимального значения. В векторном изображении должны были бы быть представлены, строго говоря, только синусоидальные величины. Общепринято все же выражать в форме векторов и эффективные значения, чему последуем и мы в дальнейшем.

Поток Φ , индуцирует в первичной и вторичной обмотке ЭДС, равные между собою при одинаковом числе витков в обеих обмотках. Эта ЭДС, согласно общим законам индукции, пропорциональна скорости изменения потока и числу витков w . Пусть число параллельных ветвей — a и общее число витков первичной или вторичной обмотки — z ; тогда активное число витков будет равно:

$$w = \frac{z}{a}.$$

Мгновенное значение ЭДС выразится

$$e = -w \cdot \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \dots \dots \dots (10)$$

¹⁾ E. Arnold. Wechselstromtechnik. Band. II. Transformatoren.

²⁾ См. H. Stössinger, El. Maschinen, S. 61, 62.

³⁾ M. Vidmar. Transformatoren. Verlag J. Springer, Berlin, 1925.

После подстановки ур. (2) эффективное значение ЭДС получится равным

$$E = + \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot w \cdot \Phi_g \cdot \sin \omega t \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \dots \dots \dots (11)$$

Если к моменту $t=0$ поток имел максимальное значение, то мгновенное значение ЭДС, отстающей по фазе на 90° , будет равно нулю. Максимальное значение ЭДС направлено в отрицательную сторону оси ординат и проекция его на ось X равна нулю. Если произведению вектора на мнимую единицу $j = \sqrt{-1}$ соответствует положительное вращение на 90° , то из ур. (11) мы получим векторное выражение:

$$\dot{E} = j \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot w \cdot \dot{\Phi}_g \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \dots \dots \dots (12)$$

При неравенстве числа витков в обмотках индуктированные ЭДС будут относиться между собою как числа витков

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k \dots \dots \dots (13)$$

Величина k носит название коэффициента трансформации.

Существенные ур. (11) и (12) дают зависимость между ЭДС и потоком. Если ЭДС трансформатора остается постоянной, что обычно и имеет место, то сохраняют свою величину и намагничивающий ток и ток холостого хода, а вместе с ними соответствующие МДС. При нагрузке трансформатора в его обмотках начинают проходить токи, не совпадающие больше по фазе с потоком и намагничивающим током. Величина вторичного тока нагрузки J_2 зависит от мощности, расходуемой потребляющими аппаратами. МДС M_2 , соответствующая этому току, геометрически складывается с МДС M_0 , соответствующей току холостого хода, что дает МДС M_1 первичной цепи. Если энергия намагничивания покрывается с первичной стороны, то

$$\dot{M}_{01} - \dot{M}_2 = \dot{M}_{m1} + \dot{M}_{w1} - \dot{M}_2 = \dot{M}_1 \text{ амп.}, \dots \dots \dots (14)$$

или, так как множитель $\frac{4\pi}{10} \cdot \sqrt{2}$ одинаков во всех выражениях МДС, то

$$j_{01} \cdot w_1 - j_2 \cdot w_2 = j_{m1} \cdot w_1 + j_{w1} \cdot w_1 - j_2 \cdot w_2 = j_1 \cdot w_1 \text{ амп.}$$

Если величиной МДС холостого хода можно пренебречь, то МДС и токи J_1 и J_2 будут друг относительно друга сдвинуты по фазе на 180° .

Законы Кирхгоффа применимы как для постоянного, так и для переменного тока. Согласно первому закону, сумма всех токов, сходящихся в одной точке замкнутой цепи и уходящих от этой точки, равна нулю

$$(\sum i = 0).$$

Таким образом, ток, поступающий в обмотку, будет всегда равен току, выходящему из нее, так как чрезвычайно малыми „блуждающими“ токами, обусловленными плохой изоляцией, можно пренебречь. Согласно второму закону Кирхгоффа, сумма всех внешних напряжений u и внутренних противодействующих напряжений e в электрической цепи равна нулю ($\sum u + \sum e = 0$). В диаграмме времени сумма векторов напряжений каждой цепи должна представлять собою замкнутую линию, так как только в этом случае сумма мгновенных значений — проекций на ось абсцисс — будет равна нулю. В идеальном трансформаторе без сопроти-

вления и без рассеяния против ЭДС цепи будет действовать равное ей и противоположное напряжение у зажимов U , так что уравнение напряжений идеального трансформатора будет:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 = 0 \text{ вольт} \dots\dots\dots (15)$$

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2 \cdot \frac{w_1}{w_2} \dots\dots\dots (16)$$

$$\dot{E}_2 + \dot{U}_2 = 0 \dots\dots\dots (17)$$

Такой идеальный трансформатор, однако, не может быть выполнен. Экономические соображения, а именно плохое использование при очень большом весе меди и железа (следовательно, высокая цена), не допускают чрезмерного приближения к идеальному трансформатору. Между напряжениями у зажимов и ЭДС всегда наблюдается более или менее крупное отклонение, вызываемое омическим и индуктивным падениями напряжения.

Омическое падение напряжения в обмотке

$$\dot{E}_r = -r \cdot \dot{J} \text{ вольт} \dots\dots\dots (18)$$

в качестве потери будет в своем изменении во времени направлено противоположно вектору тока. При переменном токе, благодаря явлению вытеснения, сопротивление тока r_{Ω} нагретой обмотки с высокими проводами будет больше, чем сопротивление этой обмотки, измеренное при постоянном токе. Явление вытеснения тока можно ослабить выбором соответствующей высоты провода, делением его и укладкой длинной стороны прямоугольного сечения в направлении линий рассеяния.

Рассеяние каждой катушки вызывает индуктивное падение напряжения E_s , отстающее от тока на 90° .

$$\dot{E}_s = j \cdot x \cdot \dot{J} \text{ вольт} \dots\dots\dots (19)$$

Так как существует пропорциональность между напряжением рассеяния и создающим его током, то можно ввести понятие реактивного сопротивления рассеяния или реакции рассеяния $x \Omega$, так как линии рассеяния образуются в воздухе, окружающем провода, в меди и в изоляционном материале с постоянной магнитной проницаемостью. Для подсчета реактивного сопротивления или потока рассеяния было предложено много формул, проверенных на практике. Рассеяние у цилиндрической обмотки значительно больше, чем у дисковой; у последней же рассеяние будет тем меньше, чем больше подразделена катушка. По Видмару дисковая обмотка с n катушками обладает напряжением рассеяния большим, чем обмотка с $n+1$ катушками, т.е. большим, чем обмотка низкого напряжения. Отношение напряжений рассеяния приблизительно равно

$$\frac{E_{sn}}{E_{sn+1}} = \frac{(n+3) \cdot n}{(n+1)^2} \dots\dots\dots (20)$$

Поток рассеяния пропорционален длине витков, расстоянию между первичными и вторичными катушками, толщине катушек, а также и силе тока; средней же длине линии рассеяния поток рассеяния будет обратно пропорционален.

Таким образом мы получим представление о всех величинах диаграммы напряжений в электрической цепи. Из уравнений идеального трансформатора (15) и (17) мы имеем:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_s + \dot{E}_r + \dot{E}_1 = \dot{U}_1 + \dot{J}_1 (j \cdot x_1 - r_1) + \dot{E}_1 = 0 \text{ вольт} \dots\dots (21)$$

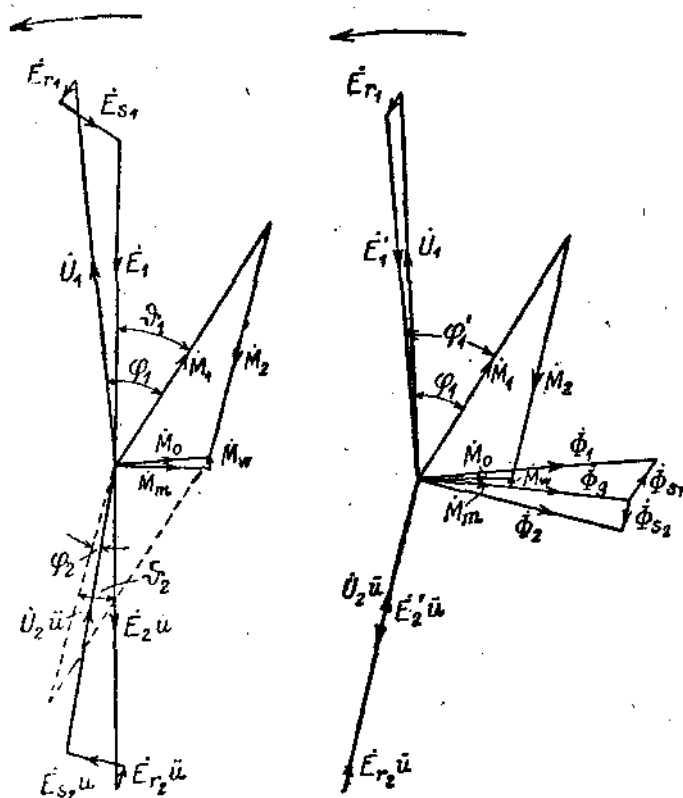
$$\dot{E}_2 + \dot{E}_s + \dot{E}_r + \dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{J}_2 (j \cdot x_2 - r_2) + \dot{U}_2 = 0 \dots\dots (22)$$

Если повторить здесь уравнения (13) и (14)

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = u. \quad (13)$$

$$\dot{M}_0 - \dot{M}_2 = \dot{M}_{w1} + \dot{M}_{w2} - \dot{M}_2 = \dot{M}_1 \text{ амп}, \quad (14)$$

то мы этим выразим в векторной форме все величины, встречающиеся в векторной диаграмме (фиг. 262 слева). Для ясности на фиг. 262 и 264 преувеличены как падения напряжения, так и МДС $\dot{M}_0$. Для того чтобы построить диаграмму времени, необходимо знать, кроме вторичной активной



Фиг. 262. Диаграмма времени.

и реактивной мощности U_2 , J_2 , φ_2 , еще и величины ω_2 , ω_1 , r_2 , r_1 , x_2 , x_1 , M_0 и φ_0 (ур. 36). Масштабы следует выбрать для напряжения, а также для МДС или для тока. Чтобы иметь возможность пользоваться одним масштабом для напряжений, необходимо умножать вторичные напряжения на u . Конец вектора E_1 совпадает тогда с концом вектора E_2 . Угол φ_1 между первичными напряжениями U_1 и током I_1 станет больше, чем φ_2 в том случае, если собственная потребность в реактивной мощности покрывается из первичной цепи и присоединяется к отданной реактивной мощности.

Можно исходить не только от суммарного потока (Оссана и др.), но и от одного из напряжений у зажимов (М. Клосс). Для чисто омической нагрузки, следовательно для $\cos \varphi_2 = 1$, мы имеем такую диаграмму на

фиг. 262 справа. ЭДС E_2' , направленная противоположно напряжению у зажимов и омическому сопротивлению вторичной цепи, вызывается потоком Φ_2 , перпендикулярным к E_2 . Вычитывая из этого потока, совпадающего по фазе с током, вторичный поток рассеяния Φ_{2s} , мы снова получим поток Φ_1 , общий для обеих обмоток. В одном направлении с этим потоком следует нанести МДС M_m , а перпендикулярно к последней строят МДС M_{2s} , геометрическая сумма последних двух векторов равна геометрической сумме МДС M_1 и M_2 . Нанеся по направлению M_1 поток рассеяния Φ_{1s} у конца вектора Φ_1 , мы получим поток Φ_1 , созданный ЭДС E_1 , после чего можно нарисовать диаграмму учетом первичного омического падения напряжения. В рассматриваемом случае угол φ_1 имеет величину, соответствующую лишь реактивной мощности трансформатора, состоящей из реактивной мощности намагничивания и рассеяния.

§ 5. Распределение мощности в трансформаторе.

Из векторной диаграммы можно получить ясное представление о процессе передачи мощности при помощи трансформатора. Первичная сеть отдает трансформатору активную мощность N_1 и реактивную — N_{b1} :

$$N_1 = U_1 \cdot J_1 \cdot \cos \varphi_1 \text{ ватт} \dots \dots \dots (23)$$

$$N_{b1} = U_1 \cdot J_1 \cdot \sin \varphi_1 \text{ ватт; } \dots \dots \dots (24)$$

в первичной обмотке теряется часть этой мощности на джоулево тепло:

$$V_{cu1} = E_r \cdot J_1 = r_1 \cdot J_1^2 \text{ ватт} \dots \dots \dots (25)$$

Угол φ_1' на фиг. 262 (справа) должен стать больше угла φ_1 , так как в отношении оставшейся активной мощности $N_1 - V_{cu1}$, реактивная мощность N_{b1} увеличилась. Реактивная мощность N_{b1} уменьшается на величину реактивных потерь от первичного рассеяния:

$$V_{b1} = E_{s1} \cdot J_1 = x_1 \cdot J_1^2 \text{ ватт} \dots \dots \dots (26)$$

В железо переходят активная и реактивная мощности; вычитываются потери в железе $V_{Fe} = J_m \cdot l_1$ и реактивные потери на перемагничивание $V_{b_m} = J_m \cdot E_1$; остальное передается вторичной обмотке в виде мощности N_{12} и N_{b12} . Если ϑ_1 — угол между E_1 и J_1 и ϑ_2 — угол между E_2 и J_2 , то

$$N_{12} = E_1 \cdot J_1 \cdot \cos \vartheta_1 - E_1 J_m = E_2 \cdot J_2 \cdot \cos \vartheta_2 \text{ ватт} \dots \dots \dots (27)$$

$$N_{b12} = E_1 \cdot J_1 \cdot \sin \vartheta_1 - E_1 \cdot J_m = E_2 \cdot J_2 \cdot \sin \vartheta_2 \text{ ватт} \dots \dots \dots (28)$$

Вычитывая снова из этих мощностей величины потерь, а именно; реактивных потерь на вторичное рассеяние:

$$V_{b2} = E_{s2} \cdot J_2 = x_2 \cdot J_2^2 \text{ ватт} \dots \dots \dots (29)$$

и джоулевых потерь

$$V_{cu2} = E_{r2} \cdot J_2 = r_2 \cdot J_2^2 \text{ ватт; } \dots \dots \dots (30)$$

мы получим активную и реактивную мощности, отданные во вторичную сеть:

$$N_2 = U_2 \cdot J_2 \cdot \cos \varphi_2 \text{ ватт} \dots \dots \dots (31)$$

$$N_{b2} = U_2 \cdot J_2 \cdot \sin \varphi_2 \text{ ватт} \dots \dots \dots (32)$$

Мощность трансформатора задается всегда в kVA. Так как активная и реактивная мощности перпендикулярны друг другу, то мощность в kVA выразится как квадратный корень из суммы квадратов этих мощностей.

При восприятии мощности обмоткой угол сдвига фаз между напряжением и током будет всегда меньше, чем 90° , при отдаче мощности этот угол будет всегда больше, чем 90° ¹⁾.

Коэффициент полезного действия трансформатора η представляет собою отношение отданной к воспринятой активной мощности. При полной нагрузке коэффициент полезного действия почти всегда выше 95%:

$$\eta = \frac{N_2}{N_1} = \frac{N_2}{N_2 + V_{c_{u1}} + V_{c_{u2}} + V_{Fe}} \dots \dots \dots (33)$$

Наряду с этим коэффициентом полезного действия для трансформаторов принят годовой коэффициент полезного действия, учитывающий то обстоятельство, что многие трансформаторы, в особенности в районных сетях, длительно работают на сеть без нагрузки, расходуя непрерывно энергию на потери в железе и воспринимая намагничивающий ток.

§ 6. Холостой ход и короткое замыкание.

При холостом ходе и коротком замыкании трансформатор не может передавать мощность. Для определения коэффициента трансформации, потерь в железе и реактивных сопротивлений эти состояния трансформатора играют крупную роль. Измерения могут производиться с первичной или с вторичной стороны.

При состоянии холостого хода вторичная цепь остается открытой, а первичная присоединяется к напряжению сети. При изменении первичного напряжения U_{10} при холостом ходе можно нанести

(фиг. 263) ток холостого хода J_0 в процентах от номинального напряжения. Таким образом получается характеристика холостого хода. Так как ток холостого хода сдвинут почти на 90° относительно U_{10} , то первичная ЭДС при холостом ходе выразится

$$E_1 = U_{10} - x_1 \cdot J_0 \text{ вольт.} \quad (34)$$

Во вторичной цепи ток отсутствует. Таким образом, напряжение, измеряемое и открытых зажимов, равно:

$$U_{20} = E_1 \cdot \frac{w_2}{w_1} = (U_{10} - x_1 \cdot J_0) \cdot \frac{w_2}{w_1} \text{ вольт.} \dots \dots \dots (35)$$

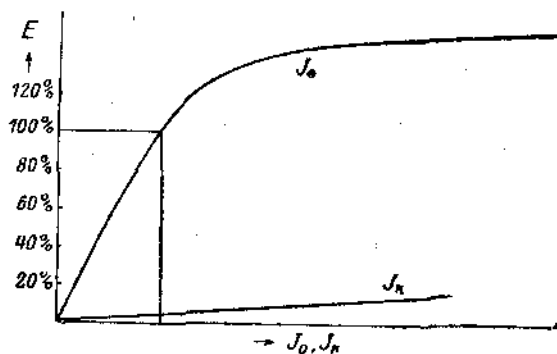
Индуктивное падение напряжения при холостом ходе в самом неблагоприятном случае достигает 0,3%. Поэтому при холостом ходе можно с большой точностью принять коэффициент трансформации равным

$$u = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_{10}}{U_{20}}$$

Джоулевы потери, возникающие при холостом ходе, очень малы. Измеряя мощность N_{10} , состоящую почти из одних потерь в железе, мы получим:

$$\cos \varphi_{10} = \frac{N_{10}}{U_{10} J_0} \approx \cos \varphi_k \dots \dots \dots (36)$$

¹⁾ M. Kloss. Vorzeichen und Richtungsregeln für Wechselstromvektordiagramme. Wissenschaftliche Veröffentlichungen des Siemens-Konzerns, 1922.



Фиг. 263. Характеристика холостого хода и короткого замыкания.

В состоянии короткого замыкания одна из обмоток замыкается на коротко, благодаря чему соответствующее напряжение у зажимов становится равным нулю. Достаточно к другой обмотке приложить напряжение в несколько процентов от нормального для того, чтобы через обе обмотки стал проходить нормальный ток нагрузки. При одинаковых омическом и индуктивном падении напряжения в первичной и вторичной обмотках ЭДС будет составлять лишь половину напряжения у зажимов. Поэтому ток холостого хода чрезвычайно незначителен в сравнении с токами короткого замыкания и ур. (14) переходит в ур. (37).

$$J_{k1} \cdot \omega_1 = -J_{k2} \cdot \omega_2 \text{ ампл.} \dots \dots \dots (37)$$

Нанеся ток короткого замыкания (в другом масштабе, чем для тока холостого хода) в зависимости от напряжения, мы получим характеристику короткого замыкания в виде прямой (фиг. 263). Активная мощность N_{k1} , воспринятая при нормальном токе в первичной обмотке и при коротко-замкнутой вторичной обмотке, соответствует джоулевым потерям; получаемая же реактивная мощность N_{bk1} соответствует реактивной мощности рассеяния при нормальной нагрузке:

$$N_{k1} = V_{cu1} + V_{cu2} = J_{k1}^2 \cdot \left[r_1 + \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 \cdot r_2 \right] = J_{k1}^2 \cdot R_1 \text{ ватт} \dots \dots (38)$$

$$N_{bk1} = V_{b1} + V_{b2} = J_{k1}^2 \cdot \left[x_1 + \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 \cdot x_2 \right] = J_{k1}^2 \cdot X_1 \text{ ватт} \dots \dots (39)$$

Величина R_1 — суммарное активное сопротивление, отнесенное к первичной обмотке, а X_1 — суммарное реактивное сопротивление. Из мощности N_{k1} , напряжения U_{k1} и силы тока можно получить коэффициент мощности при коротком замыкании:

$$\cos \varphi_{k1} = \frac{N_{k1}}{U_{k1} \cdot J_{k1}} \dots \dots \dots (40)$$

Зная активные сопротивления, можно по напряжению короткого замыкания подсчитать суммарное индуктивное падение напряжения:

$$E_s = J_{k1} \cdot X_1 = \sqrt{U_{k1}^2 - J_{k1}^2 \cdot R_1^2} \text{ вольт} \dots \dots \dots (41)$$

Короткое замыкание у вторичных зажимов при полном первичном напряжении вызывает длительный ток короткого замыкания. Последний получается путем пропорционального пересчета с напряжения короткого замыкания на нормальное напряжение. Толчок тока короткого замыкания, возникающий в первое мгновение короткого замыкания, может составлять $2\sqrt{2}$ -кратную величину от длительного тока короткого замыкания ¹⁾.

Этот толчок тока в 50—100 раз больше нормального тока в зависимости от величины падений напряжения. В нормах (RET 23) указывается, что катушки трансформатора должны без вреда выдержать усилия между обмотками, пропорциональные квадрату мгновенного тока короткого замыкания.

Если опыт холостого хода при нормальном напряжении и опыт короткого замыкания при нормальной силе тока продлить до установления постоянного температурного режима, то при опыте холостого хода мы получим представление о нагревании железа, а при опыте короткого замыкания получим данные о нагревании обмоток. Превышение температуры, представляющее собою разность между отчитываемой температурой и температурой окружающей среды, приблизительно соответствует нагреванию при нормальной нагрузке и не должно превосходить пределов, указанных нормами (RET 23).

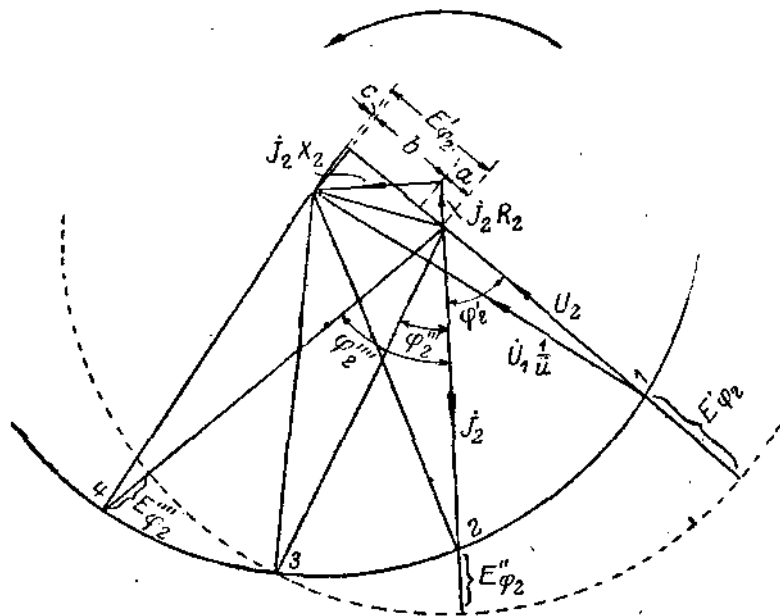
¹⁾ R. Rüdenberg. Elektrische Schaltvorgänge. Verlag J. Springer, Berlin.

§ 7. Падение напряжения в трансформаторе.

Для суждения о работе трансформатора при различных режимах необходимо знать падение напряжения в нем. Падение напряжения E_φ представляет собою сумму векторов омического и индуктивного падений напряжения. Отнесенное к вторичной стороне оно выразится

$$\dot{E}_{\varphi_2} = \dot{U}_1 \frac{\omega_2}{\omega_1} - \dot{U}_2 = \frac{\omega_2}{\omega_1} (\dot{E}_1 + \dot{E}_r) - \dot{E}_1 - \dot{E}_r, \text{ вольт} \dots (42)$$

На диаграмме Каппа (фиг. 264) не учтена разница в фазах между омическим и индуктивным падением напряжения первичной и вторичной цепи. Пусть так J_2 — постоянная величина, не меняющая своего положения на фигуре. В этом случае неизменными по величине и по положению



Фиг. 264. Падение напряжения при различной активной и реактивной нагрузке.

окажутся также суммарное омическое падение напряжения $R_2 \cdot J_2$ и индуктивное падение $J_2 \cdot X_2$. Окружность, описанная радиусом $U_1 \cdot \frac{1}{a}$, является геометрическим местом для неизменного первичного напряжения и в то же время началом вектора меняющегося вторичного напряжения. Диаграмма построена для четырех различных нагрузок. При индуктивной нагрузке и при токе, отстающем по фазе на угол φ_2' , проекция падения напряжения на вектор вторичного напряжения в положении 1 выразится отрезком E_{φ_2}' . Сумма вторичного напряжения и этого падения представляет собою радиус пунктирной окружности, также равный $U_1 \cdot \frac{1}{a}$. При чисто омической нагрузке (положение 2) падение напряжения E_{φ_2}'' будет несколько больше, чем суммарное омическое падение напряжения. При определенной емкостной нагрузке (положение 3) отношение напряжений у зажимов будет

равно отношению числа витков. При дальнейшем увеличении емкостной нагрузки (положение 4) вторичное напряжение увеличится на E_{φ_2}'''' . Если оказывается возможным изменить соотношение между реактивной и активной нагрузками, то этим самым, при неизменном напряжении сети, изменится и вторичное напряжение.

В нормах (RET) даны формулы для подсчета падения напряжения. Это падение состоит из трех частей (фиг. 264):

$$a = J_2 \cdot R_2 \cdot \cos \varphi_2; \quad b = J_2 \cdot X_2 \cdot \sin \varphi_2 \text{ вольт}$$

$$c = \sqrt{10000 - [J_2 (X_2 \cos \varphi_2 - R_2 \sin \varphi_2)]^2} \text{ вольт.}$$

Величиной c , вообще говоря, можно пренебречь без значительных погрешностей.

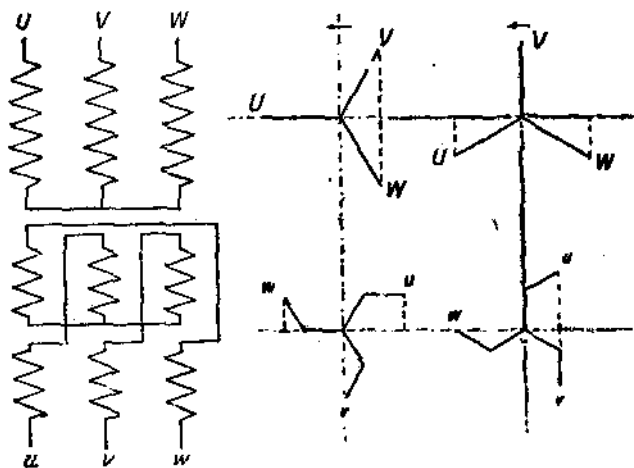
§ 8. Трехфазный трансформатор.

Основные признаки трехфазных трансформаторов приведены в § 1. Аналогично напряжениям и токам, сдвинуты между собою во времени на 120° также и потоки отдельных фаз. На фиг. 265 (наверху справа) представлен поток в фазе U, V, W для двух различных мгновений при сдвиге фаз в 30° . Проекция фазы U в средней фигуре дает максимум, а спустя $\frac{1}{12}$ периода (фигура справа) проекция равна лишь $\frac{\sqrt{3}}{2}$ от максимума. Спустя еще $\frac{1}{12}$ периода максимальное значение будет иметь поток фазы W . Абсолютная величина потока в продолжение одного периода колеблется шесть раз около этих значений.

Максимальная величина потока в кернах приблизительно в 1,5 раза больше максимального значения потока отдельной фазы.

В трехфазном стержневом трансформаторе с кернами, расположенными в одной плоскости, ток холостого хода в отдельных фазах будет различен, а потому должен быть подсчитан для каждой фазы в отдельности. Для среднего керна средняя длина индукционной линии должна быть взята меньшей, чем для наружных кернов. В этом отношении гораздо лучше обстоит дело с трехфазным броневым трансформатором.

Векторная диаграмма отдельных фаз остается та же, что и при однофазном трансформаторе в том случае, если для токов и напряжений принять фазовые значения. Токи в сети и междуфазовые напряжения зависят от типа соединения. Кроме применяемого в большинстве случаев соединения звездой, при котором междуфазовое напряжение в $\sqrt{3}$ раза больше фазового, а ток в сети равен фазовому току, и кроме соединения треугольником, при котором междуфазовое напряжение равно фазовому, а фазо-



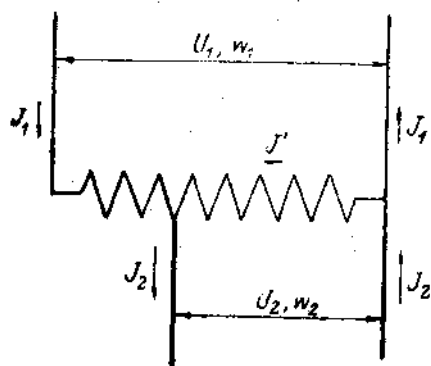
Фиг. 265. Соединение „звезда-зигзаг“.

вый ток составляет лишь $\frac{1}{\sqrt{3}}$ часть от тока сети, — применяется еще соединение зигзагом или двойной звездой. На фиг. 265 представлено соединение звезда-зигзаг. Фазовое напряжение при соединении зигзагом составляется из двух напряжений, сдвинутых друг относительно друга на 60° . Здесь фазовое напряжение больше в $\frac{\sqrt{3}}{2}$ раза, а междуфазовое напряжение больше в 1,5 раза, чем фазовое напряжение при соединении звездой с тем же числом витков. Токи также складываются из двух составляющих, сдвинутых друг относительно друга на 60° . Так как при соединении звездой требуется относительно небольшое количество витков, то такое соединение особенно пригодно для высоких напряжений. При соединении звездой нагрузка фаз не должна быть неравномерной¹⁾. Согласно нормам (RET), через нулевую точку звезды может проходить ток не больший, чем 10% от нормального тока во внешних проводах при равномерно распределенной нагрузке. Соединение в зигзаг также способствует выравниванию неравномерностей; оно применяется в малых распределительных трансформаторах, а соединение треугольник-звезда — в больших трансформаторах. Для осветительных установок нулевая точка выводится в качестве четвертого провода; между ним и каждой фазой включаются лампы.

В нормах (RET 23) приводятся четыре группы схем, из них каждая с тремя типами соединений с одинаковыми положениями фаз¹⁾. Параллельно друг с другом могут работать трансформаторы только с одинаковым положением фаз; кроме того необходимо, чтобы у них были одинаковые коэффициенты трансформации и чтобы их напряжения короткого замыкания, согласно нормам (RET), не отличались одно от другого больше чем на $\pm 10\%$.

§ 9. Особые конструкции.

При небольших коэффициентах трансформации (в регулирующих трансформаторах и т. д.) очень часто применяется соединение в виде автотрансформатора (фиг. 266). Последний очень дешев, так как в нем объе-



Фиг. 266. Автотрансформатор.

динены в одной обмотке первичная и вторичная обмотки. В части первичной обмотки, не расположенной между вторичными зажимами, индуцируется ЭДС, уравновешивающая часть первичного напряжения у зажимов. Вместо того, чтобы проходить по w_1 виткам, первичный ток проходит только через $w_1 - w_2$ витков. Вторичный ток определяется здесь также из ур. (7):

$$J_2 = \frac{w_1}{w_2} (J_{01} - J_1) \text{ амп.}$$

В витках между вторичными зажимами должна действовать МДС, уравновешивающая МДС первичной цепи. Однако ток J' , проходящий по этой части обмотки, является геометрической разностью между вторичным и первичным токами; он будет тем

¹⁾ См. Видмар. Трансформатор в эксплуатации, перевод под ред. Е. В. Нитусова 1929 г. изд. Гостехиздата.

незначительней, чем меньше коэффициент трансформации. Таким образом, если пренебречь током холостого хода, то скалярное значение J' будет приблизительно равно

$$J' \approx \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} \cdot J_2$$

Джоулевы потери здесь в сравнении с обыкновенным трансформатором значительно меньше. Так как размеры трансформатора зависят от тепловых потерь, то автотрансформатор получается всегда небольших размеров. При коэффициенте трансформации большем 3 экономия становится незначительной и начинает сказываться тот недостаток, что катушки высокого и низкого напряжения не изолированы друг от друга. Автотрансформатор вызывает затруднения в смысле прочности при коротких замыканиях, так как падения напряжения в нем незначительны.

Фазовые трансформаторы служат для изменения числа фаз. Наиболее известным является соединение Скотта ¹⁾ (Scott), по которому двухфазный ток может быть преобразован в симметричный трехфазный. Перед вращающимися преобразователями и перед выпрямителями часто приходится преобразовывать трехфазный ток в шестифазный. Решением для этого случая является соединение, аналогичное зигзагу со второй нулевой точкой.

Измерительные трансформаторы служат для того, чтобы измерительные приборы и вспомогательные аппараты не подвергать действию высоких напряжений и больших токов. В качестве трансформаторов напряжения они служат для понижения высокого напряжения, а в качестве трансформаторов тока они употребляются для преобразования сильных токов до значений, необходимых для измерительных целей.

В индукционных печах в качестве вторичной катушки служит расплавляемый металл.

§ 10. Конструкции.

Мощность трансформаторов задается в kVA. В первой таблице приводятся данные из каталогов для трех различных трехфазных трансформаторов до 11 000 вольт на стороне высокого напряжения. Из таблицы видны действительные размеры падений напряжения (фиг. 262 и 264). Изменению напряжения при безиндукционной нагрузке $R_1 \cdot J_1$ соответствуют джоулевы потери $R_1 \cdot J_1^2$ в процентах от полной нагрузки. Последние изменяются пропорционально квадрату нагрузки, тогда как потери холостого хода остаются постоянными.

kVA	Соединение	КПД при чисто омической нагрузке	Допуск для КПД	Изменение напряжения при чисто омической полной нагрузке, допуск: + 10%	Напряжение короткого замыкания, допуск: + 10% — 20%	Потери холостого хода в ваттах, около:
5		95,6	$\pm 0,44\%$	3,2%	4,2%	70
100		97,44	$\pm 0,25\%$	2%	3,5%	630
1 000		98,15	$\pm 0,19\%$	1,52%	3%	3 580

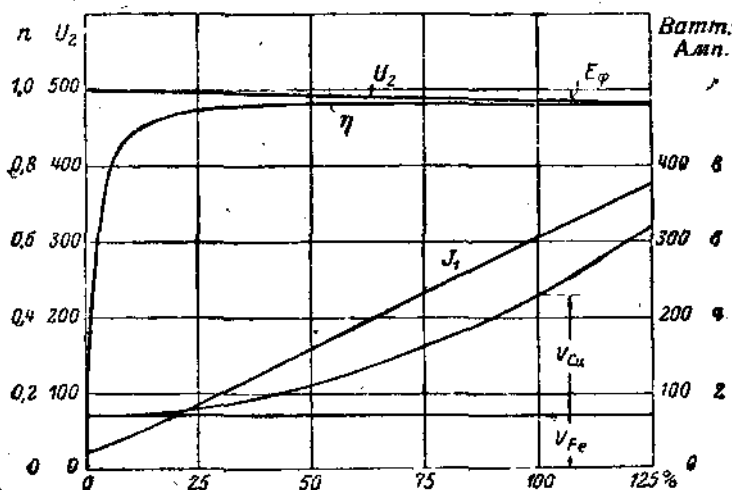
¹⁾ Bunet. Les transformateurs.

Прим. переводчика.

На фиг. 267 приведены кривые для трансформатора в 5 kVA. Кривая коэффициента мощности не построена, так как при всех нагрузках выше 25% $\cos \varphi_1$ почти = 1.

Использование одного и того же трансформатора при различных числах периодов дано во второй таблице, в которой мощность при 50 периодах принята за 100%.

Число периодов	80	45	42	40
Мощность в процентах	110	95	90	85



Фиг. 267. Кривые трехфазного трансформатора при безиндукционной нагрузке 5 kVA, 500 вольт, 50 пер.

На фиг. 268 представлена конструкция небольшого трехфазного стержневого трансформатора, у которого сердечник с обмоткой вынут из кожуха. На фиг. 269 изображен внешний вид трехфазного трансформатора на 300 kVA, 10 250/542 вольт и 50 периодов с двумя ответвлениями для 10 000 и 9 750 вольт.

Фиг. 270 показывает сердечник с обмоткой для трансформатора в 400 kVA 7 500/230 вольт при 50 периодах. На фиг. 271 представлен без кожуха мощный трансформатор с масляным охлаждением на 7 500 kVA, 50 000/15 900 вольт и 50 периодов.

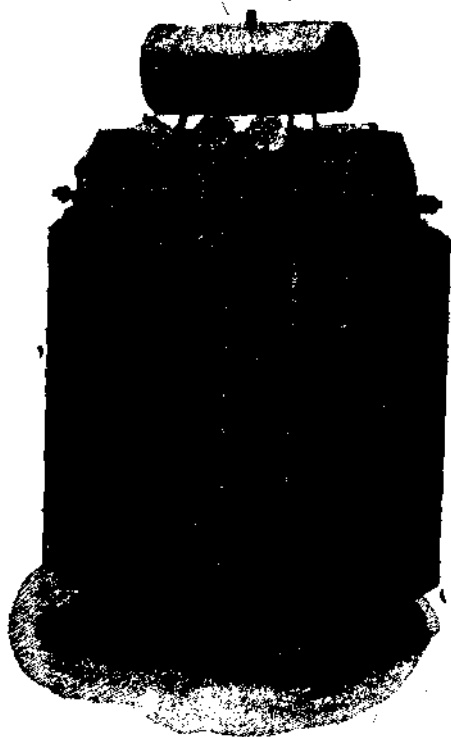
На фиг. 272 показан трансформатор станции в Вальхензее (Walchensee), установленный в камере.

§ 11. Данные для расчета трансформаторов.

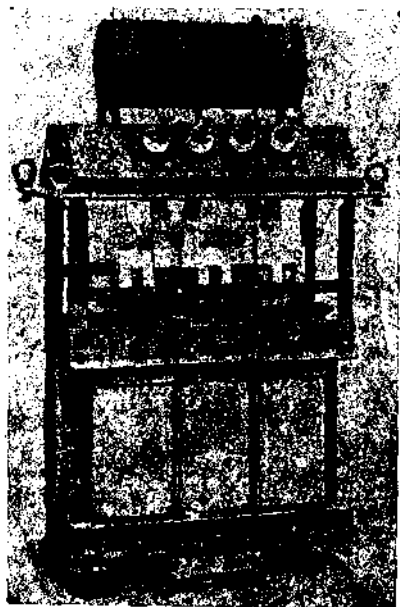
Величина трансформатора, потребное количество железа и меди зависят от превышения температуры, допустимого для трансформатора согласно нормам (RET). Для достижения наиболее благоприятного коэффициента полезного действия необходимо взять равными потери в железе и потери в меди при полной нагрузке, иначе говоря, необходимо стремиться к тому, чтобы отношение потерь в железе к потерям в меди было



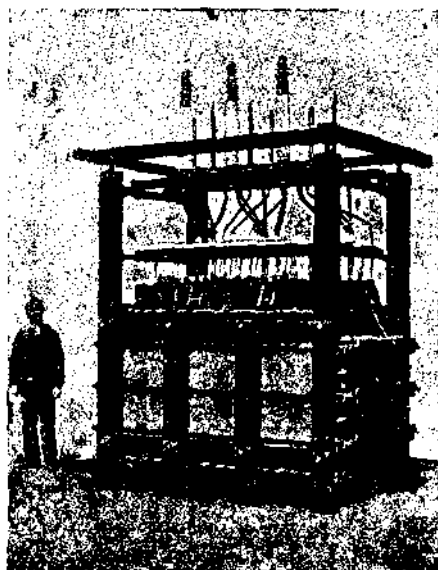
Фиг. 268. Трехфазный стержневой трансформатор.



Фиг. 269. Трехфазный трансформатор с масляным охлаждением



Фиг. 270. Сердечник и обмотка трансформатора.



Фиг. 271. Мощный трансформатор с масляным охлаждением.

равно единице ($\beta = 1$)¹⁾. Однако, в зависимости от назначения наблюдаются большие отклонения от этой величины. Для улучшения годового коэффициента полезного действия в чисто осветительных трансформаторах²⁾ принимают $\beta = 0,5 \div 0,85$. В трансформаторах, служащих одновременно для осветительных и силовых нагрузок, величина β колеблется в пределах от 0,85—1,85.

Опыт показывает, что для достижения таких соотношений, при применении обыкновенного листового железа, необходимо выбрать для осветительных трансформаторов индукцию от 6 до 10 000 гауссов, а для осветительных и силовых трансформаторов — индукцию от 10 до 13 000 гауссов.



Фиг. 272. Трансформатор электро-станции Walchensee.

Применяя для силовых трансформаторов легированное железо, можно повысить индукцию до величины $12 \div 15 000$ гауссов. При небольших числах периодов ($16 \frac{2}{3}$, 25 периодов) железо нагружают до 15 000 гауссов. Для величины зазора (см. § 1) при скреплении „встык“ принимают значение около 0,005 мм, а при скреплении „внахлестку“ — 0,0035 мм.

Для нагрузки меди плотность тока на 1 мм² поперечного сечения является опытной величиной; при слабом воздушном охлаждении она принимается равной $1,4 \div 1,8$ амп./мм², при искусственном воздушном и масляном охлаждении ее выбирают от 2 до 2,5 амп./мм². При искусственном охлаждении масла и при применении змеевиков с водой нагрузка меди может быть доведена до

4,5 амп./мм². Для первичной и вторичной обмоток берут одинаковые плотности токов. В малых трансформаторах индукция и плотность тока, вообще говоря, могут быть взяты большими, чем в очень крупных трансформаторах, так как поверхность железа возрастает медленнее, чем его объем, а при данном охлаждении требуется определенная поверхность для излучения.

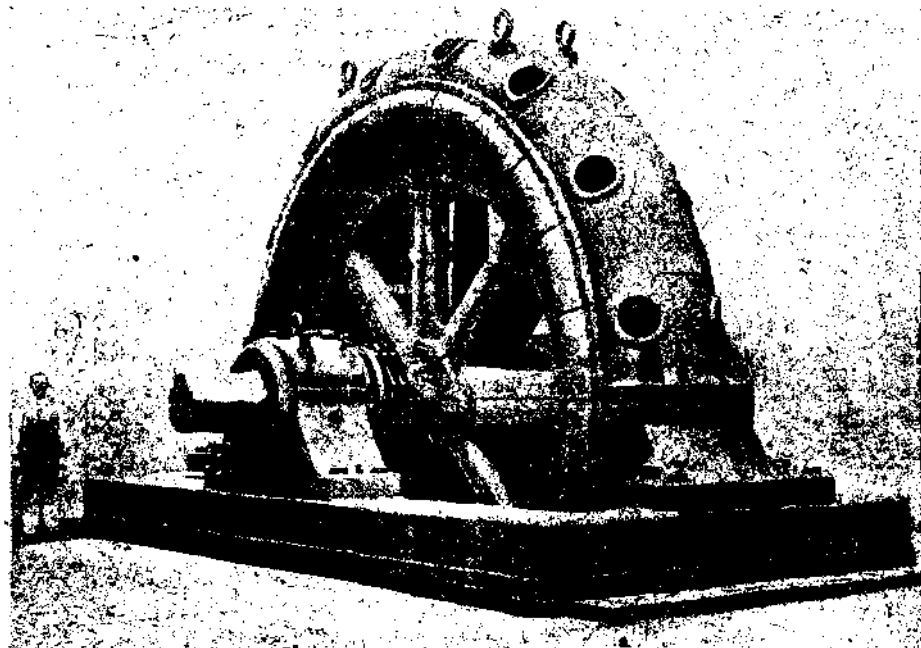
Обмотки, обычно медные, изготавливаются из круглого или плоского провода и подразделяются на отдельные катушки. Между двумя слоями проводов напряжение не должно превосходить 500 вольт. Толщина изоляции между слоями зависит от напряжения между ними. Каждый отдельный провод обматывается хлопчатой бумагой, а при высоких напряжениях и больших сечениях, кроме того, оплетается. Если обмотки нахо-

¹⁾ M. Vidmar. Der Entwurf der Transformatoren. Elektrot u. Maschinenbau, 1917.

²⁾ Andronescu. Die Berechnung des Kerntransformators. ETZ, 1924.

дятся в масле, то не следует применять в качестве изоляционного материала никакие растворяющиеся в масле препараты из резины и миканита.

Цилиндрические обмотки требуют меньше изоляционного материала, чем дисковые обмотки, так как катушка высокого напряжения может быть отделена от катушки низкого напряжения одним цилиндрическим слоем изоляционного материала. Так как механические усилия от действия тока в цилиндрических катушках равномерно направлены наружу по радиусу, то такие катушки особенно хорошо противостоят колебаниям нагрузки и коротким замыканиям. Дисковые же катушки должны быть отделены одна от другой при помощи деревянных прокладок, так как при толчках нагрузки усилия между катушками действуют по направлению



Фиг. 273. Тихоходный трехфазный двигатель на 3000 kW.

оси керна. Крайние катушки удерживаются в своем положении при помощи плит (фиг. 268). При высоких напряжениях начала обмоток изолируются особенно сильно для защиты от перенапряжений и блуждающих волн, так как опыт показал, что пробой в большинстве случаев наблюдается в началах фаз. Согласно нормам (RET), готовый трансформатор перед тем как покинуть место изготовления должен быть подвергнут испытанию как в смысле прочности изоляции обмотки и отдельных витков, так и в смысле противодействия волне напряжения.

Использование пространства учитывается коэффициентами заполнения железа и меди. При применении воздушных каналов для охлаждения коэффициент использования железа падает до 0,65. Коэффициент заполнения меди зависит, прежде всего, от применяемого изоляционного материала. Действительное сечение меди занимает лишь незначительную часть сечения „окна“, а именно при трансформаторах большой мощности и при высоком напряжении приблизительно 0,1, а при низких напряжениях 0,5; при небольших мощностях значения становятся еще меньше.

Для вводов через крышку кожуха применяют картон или фарфор, а при очень больших напряжениях — ввод Нагеля (Nagel).

Сухие трансформаторы, вообще говоря, не строятся на мощность большую, чем 100 kVA. С экономической точки зрения выгодно захватить возможно более широкую область применения сухих трансформаторов.

Масляное охлаждение обеспечивает хорошую изоляцию, а также защиту от пыли и влаги. Особенное значение придается применению весьма доброкачественного масла. Для качества трансформаторного масла ставятся определенные условия; лишь масло, свободное от сернистых соединений, от щелочей и от влаги, может обеспечить бесперебойную работу. Масляный консерватор, монтируемый в малых трансформаторах на крышке кожуха (фиг. 268, 269, 270), в больших трансформаторах устанавливается отдельно (фиг. 272); он поддерживает избыточное давление в кожухе всегда незначительным и дает место для расширения масла при нагревании.

Масляный кожух изготавливается из чугуна с охлаждающими ребрами или из сваренных волнистых листов железа. Величина кожуха подбирается по потребному количеству масла. Кожух должен обладать достаточно большой поверхностью для того, чтобы путем отдачи теплоокружающему воздуху, остаться в рамках допустимой нормами температуры.

В. Асинхронная машина.

§ 1. Область применения и общее устройство.

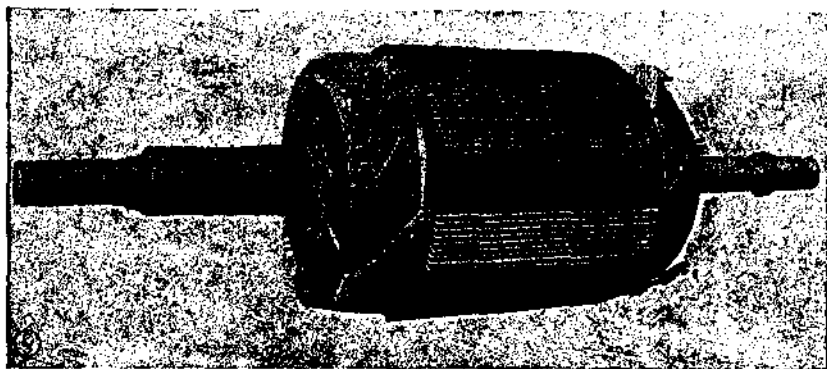
В электрическом отношении асинхронная машина имеет большое сходство с трансформатором. Магнитная энергия, необходимая для преобразования мощности, должна подаваться в виде реактивной мощности через первичную или вторичную обмотку от постороннего источника. Благодаря этой зависимости от источника, доставляющего реактивную мощность, и от напряжения и числа периодов сети, асинхронная машина получила широкое применение в качестве двигателя, в качестве же генератора она почти не употребляется.

Электрически подведенная энергия преобразуется в первичной цепи в магнитную энергию. Эта магнитная энергия, благодаря соответствующему расположению обмотки, распределяется синусоидально в воздушном зазоре машины. В многофазных машинах максимальное значение индукции почти неизменной величины вращается относительно обмотки со скоростью, зависящей от числа периодов и числа полюсов. Поток (здесь, следовательно, вращающийся поток) пронизывает вторичную обмотку и вызывает в ней ЭДС; по замкнутой вторичной цепи потечет ток с числом периодов первичной цепи, поскольку обмотки находятся друг относительно друга в покое. Вращающийся трансформатор, применяемый для регулировки напряжения в сетях и перед одноякорными преобразователями, имеет большое сходство с неподвижной асинхронной машиной. Если одна из обмоток начинает вращаться относительно другой, то изменится число периодов и величина индуктированного вторичного напряжения и число периодов тока. Многофазные асинхронные машины пригодны поэтому для преобразования числа периодов. В многофазной асинхронной машине, работающей как двигатель, подвижная часть под действием индуктированных напряжений и токов приходит в движение и вращается с конечным числом оборотов, отличающимся от синхронного числа оборотов первичного вращающегося поля на величину скольжения.

Вращающаяся часть ненагруженной машины движется почти синхронно с вращающимся потоком; при нагрузке же скольжения пропорционально

увеличивается. Скольжение нагруженной машины при малой мощности составляет 5% и больше, а при большой мощности часто лишь 0,5% от синхронного числа оборотов. При коротко-замкнутой вторичной обмотке характеристика получается шунтовой, что и требуется для большинства механических приводов.

Тому обстоятельству, что ЭДС обмотки при незначительном числе периодов скольжения также оказывается небольшой, асинхронная машина обязана тем, что из вторичной ее цепи может доставляться энергия намагничивания для машины, а при соответствующем перекомпенсировании может подаваться реактивная мощность и в сеть при помощи относительно небольших трехфазных возбуждающих машин. О том, что число оборотов больших асинхронных машин может быть регулируемо вспомогательными машинами, было уже упомянуто. Если асинхронная машина должна работать в качестве генератора, то она должна быть приведена в гиперсинхронное вращение. Вместо почти исключительно применяемого трехфазного тока можно при том же использовании машины ввести двухфазный ток с углом сдвига фаз в 90° .



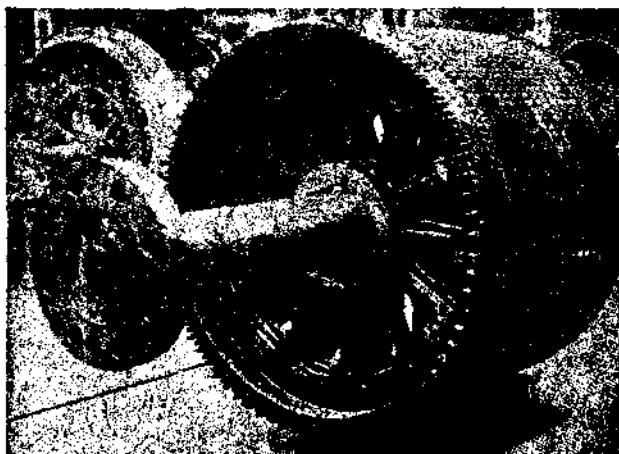
Фиг. 274. Ротор при укладке стержней нижнего слоя.

Однофазную асинхронную машину строят реже, чем трехфазный двигатель, из-за ее худшего использования и неблагоприятных условий пуска. Ее поток неподвижен относительно обмотки и меняет всю величину только во времени. Для пуска требуется вспомогательная обмотка, перед которой включается дроссельная катушка, благодаря чему образуется эллиптическое вращающееся поле. Машина не может быть использована в качестве преобразователя числа периодов, а ее число оборотов не может быть регулируемо в широких пределах при помощи сопротивлений в цепи ротора или при помощи вспомогательных машин. Нагрузочная характеристика такая же, как у многофазной асинхронной машины.

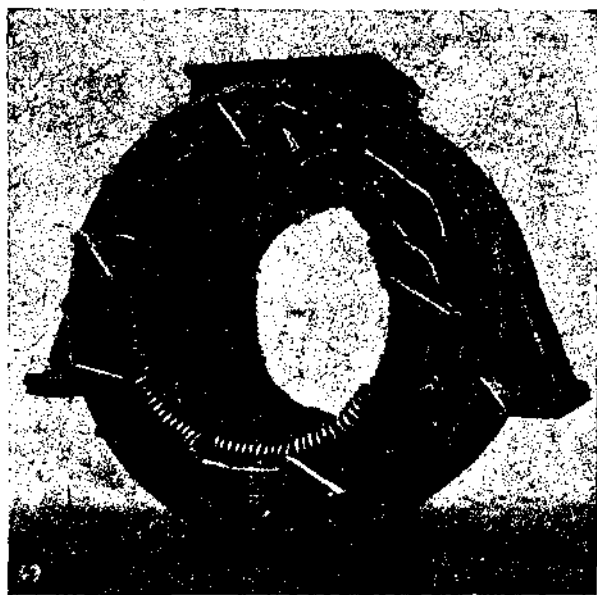
Первичная обмотка большей частью находится в статоре — в неподвижной части машины. В чугунном остоле укреплены активные в магнитном отношении пакеты железных листов, имеющие форму полого цилиндра. В „отверстии“ статора вращается ротор барабанного типа, активные железные части которого также собираются из листов, так как неподвижные полюса здесь отсутствуют.

Так как для получения возможно меньшего намагничивающего тока желателен возможно меньший зазор между статором и ротором, то величина зазора определяется исключительно условиями механической выполнимости. Пакеты железа в статоре и роторе собираются из листов

легированного железа, толщиной обычно в 0,5 мм. Для уменьшения вихревых токов железные листы обклеиваются с одной стороны шелковистой бумагой или покрываются изолирующим лаком. Листы ротора и статора зажимаются

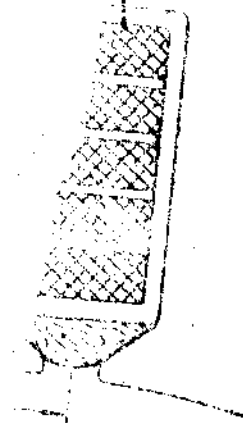
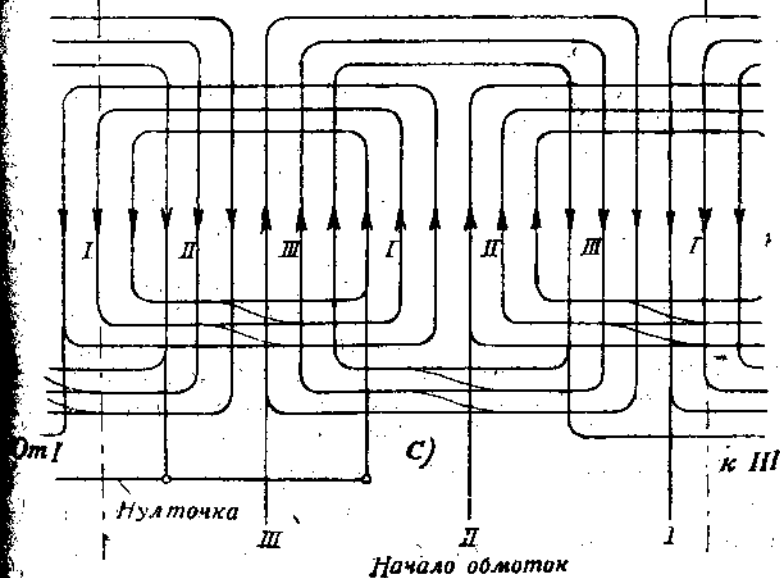
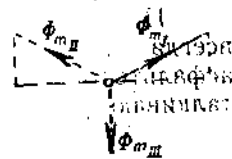
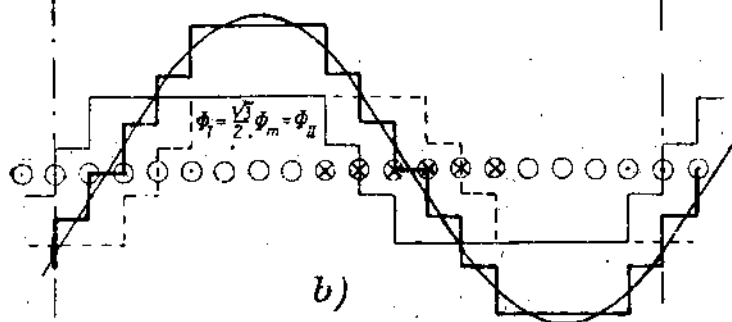
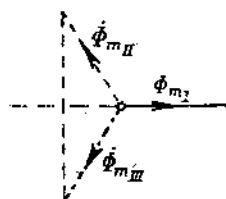
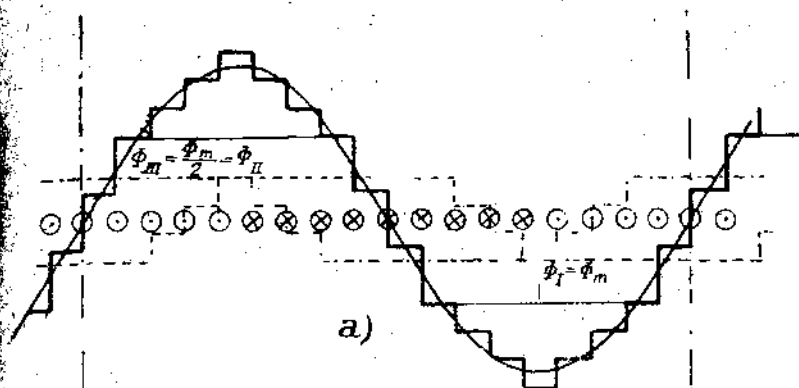


Фиг. 275. Ротор с готовой обмоткой.



Фиг. 276. Статор трехфазной асинхронной машины с катушечной обмоткой и с лобовыми креплениями.

в плитах и скрепляются болтами. Железные листы ротора или насаживаются непосредственно на валу, или при больших диаметрах укрепляются на ободе в углублении, имеющем вид ласточкина хвоста. Если пакеты оказываются шире 15 см, то для лучшего отведения тепла их следует разделить воздушными каналами (фиг. 274 и 275).

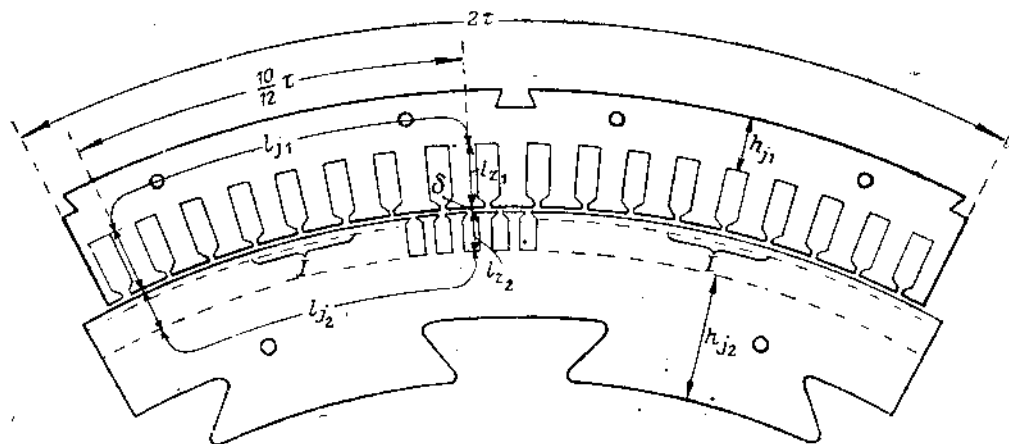


Фиг. 277.

Эта схема применяется для трансформаторов с воздушным охлаждением. В ней показаны основные элементы конструкции: магнитопровод, обмотки, система охлаждения и т.д.

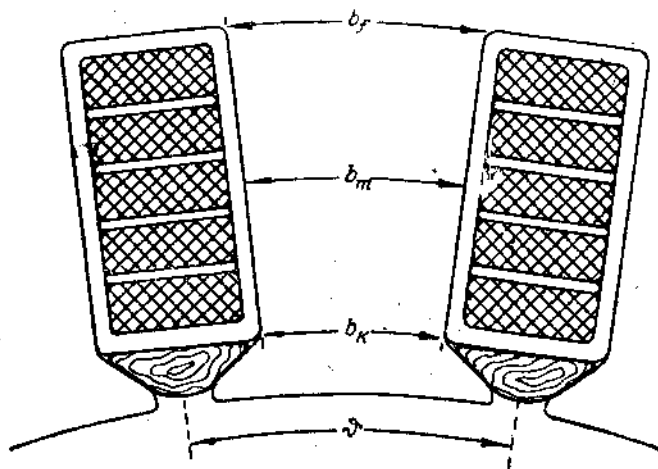
Фиг. 277.

Перед сборкой в листах статора и ротора со стороны воздушного зазора штампуются пазы, в которых укладываются обмотки. Пазы редко выполняются закрытыми; большей частью делаются прорезы для прокладки обмоток, при чем рассеяние остается незначительным.



Фиг. 278. Железные листы большой асинхронной машины.

При напряжении выше 4000 вольт отдельные катушки выполняются всегда вне машины в виде шаблонных обмоток, затем пропитываются асфальтовой массой под вакуумом; после этого они или разрезаются, проталкиваются через паз и снова запаиваются, или же укладываются в открытые пазы. Для замыкания открытых пазов некоторые фирмы применяют железные клинья, составленные из отдельных пластин. Машины, которым предстоит работа в химических фабриках или влажных помещениях, должны быть особенно хорошо изолированы.



Фиг. 279. Поперечное сечение паза с обмоткой.

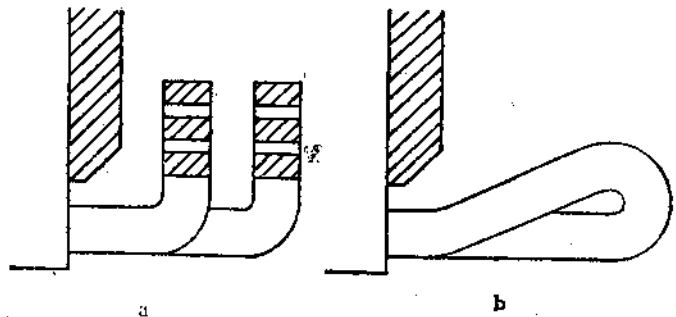
Обмотка статора, как и в синхронной машине, очень часто выполняется в виде катушечной обмотки с длинными и короткими катушками (фиг. 276, 277с, 280а и 287). При соответствующем напря-

жении преимущество на стороне двуслойной волновой обмотки или комбинированной обмотки (фиг. 280b), так как благодаря более коротким головкам катушек уменьшается вес меди и рассеяние. В однофазном асинхронном двигателе обмотка укладывается только в $\frac{2}{3}$ всех пазов статора. Мощность этого двигателя равна лишь $\frac{2}{3}$ от мощности трехфазного двигателя той же величины. Ротор всех многофазных и однофазных асин-

хронных машин почти всегда выполняется с трехфазной двуслойной волновой обмоткой, имеющей два медных стержня в одном пазу (фиг. 274 и 275). В роторах двустержневые обмотки редко заменяются катушечными обмотками. Свободные концы обмотки ротора подводятся к контактным кольцам, служащим для пуска. Во время работы обмотку замыкают накоротко и поднимают щетки над контактными кольцами. При коротко-замкнутых роторах (фиг. 287) в пазы укладываются неизолированные медные стержни, соединяемые между собою на концах при помощи колец.

Как и во всех машинах, большое значение следует придавать вентиляции. Тихоходные машины на 1000 и меньшее число оборотов в минуту строятся обычно открытыми, так что воздух может свободно проникать в машину. Вентиляционные ребра, выступающие за края обмотки ротора, могут улучшить движение воздуха. Быстроходные и очень мощные машины с большими окружными скоростями для лучшего охлаждения и для избежания сильного шума устраиваются с закрытой вентиляцией (фиг. 298).

Через особые отверстия, большей частью снизу, воздух засасывается и направляется в машину. Количество воздуха, необходимое для охлаждения, может быть увеличено крыльями вентилятора, укрепленного на валу машины. Вместо собственной вентиляции применяется иногда посторонняя вентиляция, при помощи отдельно установленных вентиляторов.



Фиг. 280. Головки обмоток: а) катушечной обмотки и б) комбинированной обмотки.

В больших установках в настоящее время применяется циркуляционное охлаждение нагретого воздуха при помощи обратных охладителей, что предохраняет машины от запыления. Установка на открытом воздухе, в химических фабриках и т. д. требует совершенно замкнутой конструкции. Благодаря худшим условиям охлаждения закрытые двигатели при той же мощности оказываются значительно больших размеров, чем открытые двигатели. Пределы нагревания для каждого отдельного случая определяются из норм (REM 23) (ср. ниже ч. II, В, § 15). Так как размеры машины зависят от предела нагревания, то хорошая вентиляция является существенной задачей конструктора.

§ 2. Вращающийся поток.

Предположим, что первичная обмотка присоединяется к напряжению, изменяющимся синусоидально во времени. Для трехфазной системы со сдвигом между фазами во времени на 120° мгновенное значение частичного потока каждой фазы определяется из уравнения, соответствующего ур. (2) в главе 1. Пусть Φ — мгновенное значение, а Φ_m — максимальное значение потока одной фазы; мы получим тогда для фаз I, II и III:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_I &= \Phi_m \cdot \cos \omega t \text{ максвелл} \\ \Phi_{II} &= \Phi_m \cdot \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \text{ максвелл} \\ \Phi_{III} &= \Phi_m \cdot \cos \left(\omega t + \frac{4\pi}{3} \right) \text{ максвелл} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (43)$$

На фиг. 277 справа эти частичные потоки представлены в виде векторов. На фиг. 277а для $t = 0$ поток фазы I имеет максимальное значение, так как вектор совпадает с осью проекции. Каждое же из мгновенных значений потока в фазах II и III равно половине значения для фазы I; эти значения фаз II и III противоположны друг другу. На фиг. 277b изображено положение фазы, при котором потоки сдвинуты относительно фиг. 277а на 30° . Пусть T — длительность одного периода ($T = \frac{1}{f}$ сек.); в этом случае углу сдвига фаз в 30° будет соответствовать время $\frac{1}{12}$ длительности одного периода. В положении фазы фиг. 277b мгновенное значение фазы III = 0, мгновенные же значения фаз I и II составляют $\frac{\sqrt{3}}{2}$ от максимального значения.

Кроме предположения о синусоидальном изменении потока во времени, мы допустим также, что кривая потока может быть представлена в виде синусоидальной функции и в пространстве. Действительный вид потока показан на фиг. 277а и б слева. Здесь дано распределение потока в пространстве вдоль воздушного зазора машины для северного и южного полюсов. Пусть число пар полюсов машины — p , внутренний диаметр статора — D_i ; двойное полюсное деление выразится тогда:

$$2\tau = \frac{\pi \cdot D_i}{p} \text{ см.} \dots \dots \dots (44)$$

На фигуре двойное полюсное деление развернуто в виде прямой. Пазы, распределенные вдоль полюсного деления, представлены в виде окружностей. Одна фаза занимает одну треть полюсного деления, так что на фигуре число пазов на полюс и фазу равно $\beta = 3$. Если число активных проводов во всех пазах одинаково, то каждый паз одной фазы дает одно и то же приращение к кривой поля, изменяющейся синусоидально. Так, на фиг. 277а в рассматриваемый момент поток, созданный фазой I, будет в два раза больше, чем поток фаз II и III.

Обмотки отдельных фаз соединяются так, что их действия суммируются. Так как сдвиг фаз во времени между максимальными значениями равен 120° и не может быть изменен, то пространственный угол между максимальными значениями потока отдельных фаз должен стать равным 60° , если двойному полюсному делению 2τ соответствует 360° ¹⁾. Таким образом, в рамках двойного полюсного деления начала обмоток удалены друг от друга на 240° (фиг. 277с), тогда как концы обмоток в большинстве случаев соединены в нулевую точку звезды.

Если сложить все частичные потоки отдельных фаз, то получится суммарный поток, называемый вращающимся потоком. Так как отдельные потоки не меняют своего положения, а свою величину меняют только во времени, то результирующий вращающийся поток приобретает определенную скорость относительно обмотки и имеет во времени почти неизменное значение. На фиг. 277а максимальная индукция вращающегося потока синусоидальной кривой в два раза больше максимальной индукции одной фазы. Кривая вращающегося потока имеет заостренную форму. Плоская форма кривой вращающегося потока на фиг. 277б вызывается только фазами I и II и максимальная индукция будет в $\frac{\sqrt{3}}{2}$ раза больше, чем максимальная индукция заостренной формы. Еще через $\frac{1}{12}$ периода

¹⁾ J. Heubach. Der Drehstrommotor. Verlag J. Springer, Berlin.

достигает своего максимума поток фазы II. Максимальное значение индукции в кривой снова острой формы передвинется относительно a на $\frac{1}{6}$ двойного полюсного деления. В продолжение одного периода вращающийся поток передвигается относительно обмотки на полное полюсное деление и принимает шесть раз острую и плоскую форму. Направление движения вращающегося потока, а следовательно и направление вращения машины, меняется, если поменять местами два фазовых зажима.

Заменим вращающийся поток синусоидальным вращающимся потоком Φ_g той же площади. Графически мы получаем для максимального значения синусоидального распределения индукции B_g в среднем около 0,92 от максимального значения острой кривой вращающегося потока B_L . Отклонение от этого значения при различных числах пазов на полюс и фазу незначительно, так что им можно пренебречь. Лишь в том случае, если было бы выбрано $\beta = 1$, т.е. число пазов, совершенно непригодное благодаря невыравненной форме кривой вращающегося потока при низких числах фаз, — отклонение было бы значительным. Обмотки с числом пазов, большим 2 и 3, применяются однако в очень редких единичных случаях.

Пусть расстояние любой точки двойного полюсного деления от средней оси фазы I в угловых градусах равно x . Тогда, к моменту $t=0$ для $x=0$ индукция также будет иметь свой максимум. Для этого момента времени пространственное распределение индукции может быть выражено в следующем виде:

$$B_g = 0,92 B_L \cdot \cos x = 0,92 B_L \cdot \cos \omega t \text{ гауссов} \dots (45)$$

За время одного периода, следовательно от $t=0$ до $t=T$, максимальное значение передвигается из положения $x=0$ в положение $x=2\pi$. Вместо x можно снова ввести время ωt .

Если двойное полюсное деление уложить по окружности несколько (целое число) раз, выполнив для этого соответствующим образом обмотку, то число оборотов вращающегося потока в пространстве уменьшится. Синхронное число оборотов или число оборотов вращающегося потока в минуту n_s при f_1 периодов в секунду равно

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} \text{ об./мин.} \dots (46)$$

В качестве числа пар полюсов p может быть взято любое четное число.

Аналогично ур. (3), поток получается как произведение индукции, распределенной в воздушном зазоре, и поверхности полюса. Для того, чтобы учесть расширение индукционных линий в воздухе, целесообразно принять ширину железа l без охлаждающих промежутков, включая, однако, при этом ширину бумажной изоляции и зазоры, остающиеся несмотря на прессовку. При учете длины чистого железа ширина машины равнялась бы только $l_{Fe} = 0,91 l$.

$$\Phi_g = B_m \cdot l \cdot \tau = 0,92 \frac{2}{\pi} \cdot B_L \cdot l \cdot \tau \text{ максвелл.} \dots (47)$$

В этой формуле величина B_m представляет собою графически найденное среднее значение индукции, B_L — максимальную индукцию в воздухе при острой форме кривой поля.

Величину максимальной индукции в воздухе выбирают в зависимости от назначения машины; эта величина характеризует главное свойство машины, а именно — ее способность к перегрузке. Опытные данные о выборе индукции в воздухе для получения предписанной или желательной способности к перегрузке даны в ч. II, В, § 15.

§ 3. Ток холостого хода.

Ток холостого хода, как и в трансформаторах, представляет собою сумму векторов намагничивающего и активного тока, служащего для покрытия потерь холостого хода.

Намагничивающий ток совпадает по фазе с потоком, тогда как перпендикулярный к нему активный ток совпадает по фазе с напряжением у зажимов и опережает поток на 90° . На фиг. 277 *c* направление намагничивающего тока обозначено точкой при движении тока от чертежа к зрителю (острие стрелы) и крестом при направлении тока от зрителя (хвост стрелы). На фиг. 278 представлена средняя индукционная линия в листах железа большой машины с тремя пазами на полюс и фазу при 500 об./мин. Штампованные листы соответствуют двойному полюсному делению. Если, как например, на фиг. 277*a*, фаза I создает главную часть вращающегося потока, то максимальное значение индукции будет находиться по середине катушки той же фазы. В этом месте линии разделяются и замыкаются через последние полюса. Главная доля намагничивающегося тока, в большинстве случаев от 60—90%, служит для намагничивания воздушного зазора. При открытых пазах из-за незначительной ширины зубцов наблюдаются сильные искажения индукционных линий в воздушном зазоре. Это искажение следует учитывать при помощи формулы Кутта ¹⁾ и Арнольда ²⁾. Благодаря искажению в воздушном зазоре намагничивающий ток может оказаться в 1,2 раз, а при неблагоприятных условиях (при небольшом зазоре и незначительном числе пазов на фазу и ширину катушки) и в 1,4 раза больше, чем намагничивающий ток, подсчитанный без учета искажения. Только при узких пазовых щелях, как на фиг. 279, допустим подсчет без учета искажения.

Влияние, оказываемое индукциями в зубцах на намагничивающий ток, вопреки незначительной длине индукционной линии, будет в большинстве случаев больше влияния индукций в ярме, несмотря на то, что при высоких индукциях в зубцах часть потока проходит также и через пазы. Для точного подсчета кривую поля следовало бы пересчитать в кривую потока. При помощи графического интегрирования эта кривая поля может быть заменена синусоидальной кривой той же площади. Можно, однако, иначе получить результаты, довольно хорошо согласующиеся с данными, полученными этим сложным графическим путем; для этого следует определить напряжение поля в зубцах не для слишком большого максимального значения индукции, а для места, удаленного на 30° от места максимальных индукций. В основу этого способа положено то предположение, что в этом месте пересекаются действительные кривые поля и синусоидальные кривые, равные по площади. Пусть ϑ — пазовое деление под воздушным зазором, b — ширина зуба и 0,91 — коэффициент, учитывающий чистое железо; мы получим тогда индукцию в зубцах из индукции в воздушном зазоре:

$$B_z = \frac{0,92 \cdot B_L \cdot \vartheta}{0,91 \cdot b} \cong B_L \cdot \frac{\vartheta}{b} \text{ гауссов} \quad (48)$$

Индукцию в зубцах принято определять для трех различных поперечных сечений зуба: головки, середины и основания. В формулу следует

¹⁾ E. v. Rziha und J. Seiderer. Starkstromtechnik. Abschnitt IV. G. Ossana, Dynamobau. Verlag. Wihl. Ernst u. Co. Berlin.

²⁾ Arnold. Die Wechselstromtechnik, Bd. V. Die asynchronen Wechselstrommaschinen. Verlag J. Springer, Berlin.

поэтому для величины b подставлять последовательно значения из фиг. 279 b_k , b_m и b_f . Соответствующие напряжения пояса получаются тогда из кривой намагничивания для значения $0,87 \cdot B_s$. Если H_{sk} , H_{sm} и H_{sf} — напряжения поля у основания зубца, в его середине и у головки, то, согласно правилу Симпсона, максимальное напряжение поля будет равно:

$$H_s = \frac{1}{6} (H_{sk} + 4 \cdot H_{sm} + H_{sf}) \cdot \frac{1}{0,87} \text{ гауссов} \dots (49)$$

Индукции в ярме статора и ротора равны

$$B = \frac{\Phi_g}{2 h_s \cdot l_{Fe}} \text{ гауссов} \dots (50)$$

где h_s — высота ярма, а l_{Fe} — длина чистого железа в сантиметрах. Индукции в ярмах увеличиваются еще благодаря штамповке ласточкиных хвостов и круглых отверстий.

При подсчетах индукций по этим формулам, исходящим из общего потока, следовательно из потока в воздушном зазоре машины, следует еще учесть, что при отстающем токе J_1 индукции, благодаря падению напряжения, в статоре несколько увеличиваются, а в роторе — несколько уменьшаются.

Магнитодвижущая сила (см. ур. 9), как линейный интеграл вдоль средней индукционной линии, равна (фиг. 468):

$$\left. \begin{aligned} M_m &= \frac{4\pi}{10} \cdot 2 \cdot \beta \cdot z_n \cdot V 2 \cdot J_m = \\ &= H_c \cdot 2\delta + H_n \cdot 2 \cdot l_{n1} + H_{n2} \cdot 2 \cdot l_{n2} + \\ &\quad + H \cdot l_{j1} + H \cdot l_{j2} \text{ амп.} \end{aligned} \right\} \dots (51)$$

В этой формуле β — число пазов одной катушечной стороны, z_n — активное число проводов одного паза. Множитель 2 вводится потому, что поток создается максимально половиной каждой фазы.

Активная слагающая тока холостого хода должна покрывать потери на гистерезис и на вихревые токи, а также и потери в подшипниках и на трение о воздух. Для тока холостого хода применимы ур. (6) и (7).

§ 4. Электродвижущая сила. Скольжение.

Суммарный поток индуцирует ЭДС в обмотках статора и ротора. Благодаря распределению пазов одной фазы по некоторой части полюсного деления не все витки одной катушечной стороны одновременно охватывают вращающийся поток. Это должно быть учтено обмоточным коэффициентом. Пусть γ — отношение ширины катушечной стороны к полюсному делению, тогда обмоточный коэффициент равен

$$k = \frac{\sin \frac{\pi}{2} \cdot \gamma}{\frac{\pi}{2} \cdot \gamma} \dots (52)$$

Обмоточный коэффициент трехфазной системы, в которой одна фаза покрывает одну треть полюсного деления, равен $\frac{3}{\pi}$. При подсчете обмоточного коэффициента для отдельных чисел пазов на полюс и фазу¹⁾

¹⁾ Heubach. Der Drehstrommotor. J. Springer, Berlin.

значения будут мало отличаться от величин, подсчитанных из ур. (52) по хорде и дуге. При обмотке с одним пазом на фазу и катушечную сторону и при обмотке типа беличьего колеса обмоточный коэффициент = 1.

В коэффициенте трансформации u_m распределенной обмотки сказываются не только числа витков, но и обмоточные коэффициенты:

$$u_m = \frac{w_1 \cdot \xi_1}{w_2 \cdot \xi_2} = \frac{E_1}{E_2} \dots \dots \dots (53)$$

Введя в общее уравнение для индукции

$$e = -w \cdot \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8}$$

величину вращающегося потока (ур. 45 и 47), мы получим ур. (54), аналогичное ур. (11):

$$E_s = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot \xi \cdot w \cdot f \cdot \Phi_s \cdot \sin \omega t \cdot 10^{-8} \text{ вольт, } \dots \dots \dots (54)$$

а в векторном выражении.

$$\dot{E} = j \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot \xi \cdot w \cdot f \cdot \dot{\Phi}_s \cdot 10^{-8} \text{ вольт } \dots \dots \dots (55)$$

В этих уравнениях E — эффективное значение ЭДС и w — число витков одной фазы. Если z — суммарное число проводов, которое получается при умножении числа активных проводов одного паз z_n на число пазов, а m — число фаз, то число витков будет равно:

$$w = \frac{z}{2 \cdot m} \dots \dots \dots (56)$$

Фазы в трехфазной асинхронной машине обычно соединяются в звезду, так что напряжение между двумя проводами сети в $\sqrt{3}$ раза больше фазового напряжения. Двигатель, намотанный для соединения в звезду, будучи пересоединен в треугольник, может быть приключен к напряжению, меньшему в $\frac{1}{\sqrt{3}}$ раза, так как при соединении треугольником напряжение между проводами сети равно фазовому напряжению. Токи сети при соединении треугольником в $\sqrt{3}$ раза больше фазовых токов. Во всех уравнениях для токов и напряжений приняты всегда фазовые значения.

Двигатель с разомкнутой обмоткой ротора, присоединенный к сети, аналогичен трансформатору при холостом ходе. Отношение напряжений соответствует приблизительно отношению числа витков (как в ур. 35). Лишь при замкнутой цепи ротора возникают магнитодвижущие силы и вращающийся поток, пропорциональные токам, благодаря чему ротор увлекается вращающим полем статора и в свою очередь преодолевает противодействующие моменты. Ротор, однако, не может приобрести число оборотов вращающегося поля статора, так как при синхронизме индуцированная вторичная ЭДС, а вместе с ней и МДС, должны были бы обратиться в нуль. Для одного только момента трения даже и при короткозамкнутой обмотке ротора требуется небольшая ЭДС, благодаря чему ротор скользит относительно вращающегося поля статора. Если n_s — синхронное число оборотов ротора (ур. 46), то скольжение выразится:

$$s = \frac{n_s - n_2}{n_s} = \frac{f_1 - f_m}{f_1} = \frac{f_2}{f_1} \dots \dots \dots (57)$$

Так как при холостом ходе преодолеваются только потери на трение, то скольжение будет почти $= 0$. При нагрузке в качестве двигателя требуется большая вторичная ЭДС и скольжение будет возрастать почти пропорционально нагрузке.

В качестве генератора асинхронная машина должна быть приведена в гиперсинхронное движение, одинаково направленное с вращающимся полем статора; скольжение становится отрицательным. При неподвижной машине $s = 1$.

Так как число периодов в роторе изменяется в зависимости от его числа оборотов, то в ур. (57) вместо чисел оборотов могут быть подставлены также и числа периодов. Если f_m число периодов, соответствующее числу оборотов ротора n_2 ,

$$f_m = \frac{n_2 \cdot p}{60} \text{ пер./сек} \dots \dots \dots (58)$$

и f_2 — число периодов напряжений и токов в роторе, то сумма $f_2 + f_m$ будет всегда равна числу периодов статора.

Скорость вращающегося поля ротора в пространстве также равна скорости вращающегося поля статора. Таким образом, МДС могут геометрически суммироваться, как и в случае трансформатора.

§ 5. Рассеяние. Векторная диаграмма.

Для подсчета рассеяния в машинах в литературе встречается много формул.

Простым методом, хорошо оправдавшим себя на практике, является метод расчета рассеяния по д-ру Шенкелю¹⁾. Рассеяние асинхронного двигателя здесь подразделяется на рассеяние в пазах, у обмоточных головок статора и ротора и у вершин зубцов. Проводимость рассеяния пазов γ_p зависит от размеров пазов и от ширины машины. Эта проводимость велика при узких и глубоких пазах и мала при широких и низких пазах; кроме того, она будет тем благоприятнее, чем ближе обмотка к воздушному зазору. Проводимость рассеяния обмоточных головок λ_1 одного паза зависит от средней длины головок — этой части обмотки, расположенной вне пазов. Эта проводимость особенно значительна в машинах с большим полюсным делением, следовательно, в быстроходных машинах; при двустержневых и комбинированных обмотках (фиг. 280в), в которых головки особенно коротки и выгнуты непараллельно к пакету железа, она будет меньше, чем при обыкновенных катушечных обмотках (фиг. 276 и 280а). Рассеяние вершины зубца обуславливается небольшим зазором асинхронной машины и учитывает линии рассеяния, замыкающиеся через вершины зубцов. Проводимость рассеяния вершины зубца λ_2 будет тем меньше, чем больше воздушный зазор и чем уже щель паза в сравнении с шириной вершины зубца. При открытых пазах рассеяние вершины зубца поэтому почти отсутствует. При пазах без входных щелей (такие пазы встречаются в коротко-замкнутых роторах) через мостик, соединяющий вершины зубцов, замыкается поток рассеяния его насыщающий. Поток рассеяния проходит и в асинхронных двигателях через материал, имеющий $\mu = 1$, а потому он пропорционален МДС фазового тока. Он равен

$$\Phi_s = \frac{4\pi}{10} \cdot 2 z_n \cdot \sqrt{2} \cdot J \cdot \left[l \cdot \left(\lambda_n + \frac{\lambda_2}{2} \right) + \beta \cdot \lambda_1 \right] \cdot 10^6 \text{ максвелл.} \dots (59)$$

¹⁾ М. Schenkel. Praktische Streuungsberechnung, insbesondere bei Wechselstr.-Kollektormotoren. Elektrot. und Maschinenbau, Jahrgang, 1911.

Реактивное сопротивление рассеяния равно:

$$x = \frac{E_s}{J} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot z_n \cdot \Phi_s \cdot 10^{-8} \text{ омов.} \quad (60)$$

В формуле (59) величина l , как и раньше, означает ширину машины без охлаждающих воздушных промежутков, а z_n —активное число проводов в пазу. При нормальной нагрузке поток рассеяния обычно составляет в сумме около 25—30% от главного потока Φ_p .

Векторная диаграмма трехфазного асинхронного двигателя аналогична векторной диаграмме трансформатора. Диаграммы различаются лишь по величине вторичной ЭДС и вторичного напряжения рассеяния E_{s2} , которые необходимо умножить на скольжение, и по обмоточному коэффициенту (сравнение фиг. 291 для $\cos \varphi_1 = 1$).

$$M_1 + M_2 = M_0 \text{ амп.} \quad (61)$$

$$J_1 \cdot \xi_1 \cdot w_1 + J_2 \cdot \xi_2 \cdot w_2 = J_0 \cdot \xi_1 \cdot w_1 = J_{m1} \cdot \xi_1 \cdot w_1 + J_w \cdot \xi_1 \cdot w_1 \text{ амп.} \quad (61)$$

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_{r1} + \dot{E}_s + \dot{E}_1 = \dot{U}_1 + J_1 (ix_1 - r_1) + \dot{E}_1 = 0 \text{ вольт.} \quad (62)$$

$$s(\dot{E}_2 + \dot{E}_{s2}) + \dot{E}_{r2} + \dot{U}_2 = s(\dot{E}_2 + jx_2 \cdot J_2) - r_2 \cdot J_2 + \dot{U}_2 = 0 \text{ вольт.} \quad (63)$$

Умножив величины вторичной цепи на $\dot{u}_m$ (ур. 54), мы получим снова для векторов ЭДС одинаковые величины. При коротко-замкнутой обмотке ротора $U_2 = 0$.

§ 6. Распределение мощности.

Активная мощность, полученная статором двигателя из сети, при числе фаз m_1 , равна

$$N_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot J_1 \cdot \cos \varphi \text{ ватт.} \quad (64)$$

Часть ее прежде всего теряется в меди и железе статора. Через воздушный зазор ротору передается активная мощность N_{12} :

$$N_{12} = N_1 - V_{cu1} - V_{Fe} = N_1 - m_1 \cdot J_1^2 \cdot r_1 - V_{Fe} \text{ ватт} \quad (65)$$

Активная мощность N_{12} называется синхронной мощностью или мощностью воздушного зазора. При переходе в ротор она соответственно разбивается на электрическую мощность скольжения N_{e2} и на механическую мощность механического числа оборотов N_{m2} .

$$N_{12} = N_{e2} + N_{m2} \text{ ватт} \quad (66)$$

$$N_{e2} = s N_{12} \text{ ватт} \quad (67)$$

$$N_{m2} = (1 - s) \cdot N_{12} \text{ ватт} \quad (68)$$

В асинхронном двигателе с коротко-замкнутой обмоткой ротора активная мощность, электрически переданная обмотке ротора, состоит только из потерь в меди. Ур. (69) получается из ур. (67). Оно дает величину скольжения как отношение электрической мощности ротора к мощности воздушного зазора:

$$s = \frac{N_{e2}}{N_{12}} = \frac{m_2 \cdot J_2^2 \cdot (r_2 + R_2)}{N_1 - V_{cu1} - V_{Fe}} \approx \frac{m_2 \cdot J_2 \cdot (r_2 + R_2)}{m_1 \cdot U_{20}} \quad (69)$$

В этой формуле r_2 —нагретое сопротивление цепи ротора, R_2 —внешнее сопротивление одной фазы, включенное во вторичную цепь через

контактные кольца. Если R_2 выполнено в виде регулировочного сопротивления, то число оборотов двигателя может быть регулировано.

Чем больше предел регулировки, тем значительнее процентное выражение потерь электрической энергии в регулировочном сопротивлении.

Ток в роторе равен

$$J_2 \approx \frac{N_{12}}{m_2 \cdot E_2 \cdot (1-s)} = \frac{N_{m_2} + V_{Cu_2} + V_{Rbg}}{m_2 \cdot U_{20} \cdot (1-s)} \text{ амп.} \quad (70)$$

Вместо ЭДС E_2 можно, вообще говоря, подставить U_{20} . Величина U_{20} — это фазовое напряжение открытого неподвижного ротора при наличии номинального напряжения у первичной обмотки. Величина V_{Rbg} — это потери на трение в подшипниках и о воздух.

Механически отдаваемая полезная мощность N_{m_2} получается после вычета потерь на трение.

В качестве реактивной мощности машине должна подводиться мощность суммарного потока и полей рассеяния.

$$N_{b_1} = m_1 \cdot U_1 \cdot J_1 \cdot \sin \varphi_1 \text{ ватт} \quad (71)$$

Часть этой мощности переходит в обмотку ротора в виде реактивной мощности вторичного рассеяния

$$N_{b_2} = m_2 \cdot s \cdot E_2 \cdot J_2 = m_2 \cdot s \cdot J_2^2 \cdot x_2 \text{ ватт} \quad (72)$$

Реактивная мощность рассеяния N_{b_2} будет мала благодаря незначительности числа периодов ротора. К статору все же должна быть подведена реактивная мощность

$$N_{b_1} = m_1 \cdot x_1 \cdot J_1^2 + [m_2 \cdot x_2 \cdot J_2^2 + m_1 \cdot E_1 \cdot J_m] \text{ ватт} \quad (73)$$

так как потери на рассеяние во вторичной обмотке преобразуются для статора в отношении чисел периодов $\frac{f_1}{f_2}$.

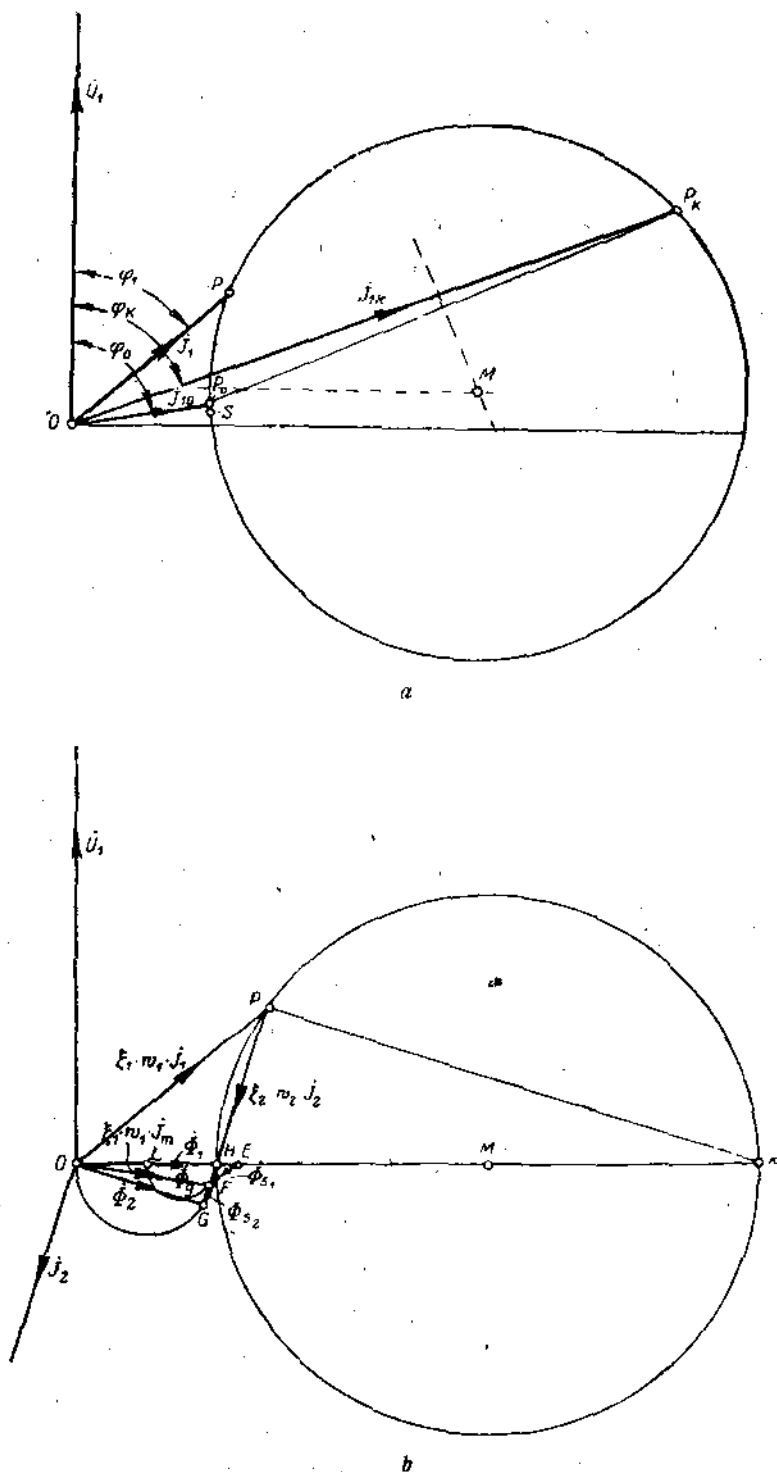
Согласно нормам (REM 23), к потерям в асинхронных машинах следует причислить еще добавочные потери в 0,5%. Эти потери создаются вихревыми токами в меди и в зубах пазов, главным образом, ротора.

§ 7. Круговая диаграмма.

Круговая диаграмма была эмпирически найдена Гейландом и точно построена Оссаной¹⁾. Если вектор постоянного напряжения у первичных зажимов направить по оси Y , то конец вектора тока будет лежать на окружности, центр которой почти совпадает с положительным направлением оси X . Круговую диаграмму можно легко и быстро построить с достаточной точностью по опытам холостого хода и короткого замыкания.

При холостом ходе коротко-замкнутый — ротор вращается почти синхронно. Ток холостого хода имеет активную составляющую, соответствующую весьма незначительным джоулевым потерям, прежде всего, однако, потерям в железе и трению в подшипниках и о воздух. Так как поток пронизывает дважды воздушный зазор, то ток холостого хода относительно велик, а именно, в быстроходных машинах он составляет около 25%, а в тихоходных машинах — часто выше 60% от нормального тока. Ток холостого хода J_{10} после выбора подходящего масштаба (1 мм = x амп.) был нанесен под углом φ_0 в виде вектора $ОРО$ (фиг. 281а). Если от активной составляющей вычесть еще потери от трения в подшипниках и о воздух,

¹⁾ Ossana. Theorie der Drehstrommotoren. Elektrotechnik und Maschinenbau, Jahrgang,



Фиг. 281. Круговая диаграмма: *a*) построение по опытам холостого хода и короткого замыкания; *b*) упрощенная кривая диаграмма.

то получится точка синхронизма S . Активную составляющую для точки синхронизма можно измерить, если привести во вращение ротор с синхронным числом оборотов.

Опыт короткого замыкания дает точку P_K круговой диаграммы. Для того, чтобы выравнять влияние различных положений зубцов статора относительно зубцов ротора, последний при снятии характеристики короткого замыкания приводится в медленное движение. В неподвижном состоянии измеряемая величина должна была бы определиться как среднее значение от величин, получаемых при различных положениях ротора. При напряжении в 15—35%, в зависимости от падения напряжения, будет проходить нормальный ток нагрузки. Так как здесь, как и при трансформаторе, характеристика короткого замыкания является почти прямой линией, то длительный ток короткого замыкания получится от пропорционального пересчета номинального напряжения. В координатной системе величина J_{1k} отложена на фигуре в том же масштабе x в виде вектора OP_K под углом φ_K . Реактивная составляющая тока короткого замыкания служит почти исключительно для покрытия потерь от рассеяния, так как Φ_s мало. Активная составляющая, значительно меньшая, чем реактивная, служит для покрытия потерь в меди, так как потерями в железе можно пренебречь.

По точкам P_0 и P_K строят круговую диаграмму. Перпендикуляр из точки P_0 на прямую OP_K делят пополам. Из точки деления проводят прямую, параллельную оси абсцисс; эта прямая будет первым геометрическим местом точек центра окружности. Перпендикуляр из середины прямой P_0P_K будет вторым геометрическим местом центров окружности.

Окружность дает всевозможные точки нагрузки асинхронной машины. Величина отрезка от O до окружности в масштабе токов дает значение первичного тока. Если P — нормальная точка нагрузки, то $\overline{OP}$ — нормальный ток и φ_1 — соответствующий угол сдвига фаз.

Упрощенная круговая диаграмма из диаграммы времени трансформатора по Клодсу (фиг. 262 справа) представлена на фиг. 281b. Диаграмма приобретает наглядность, лишь если пренебречь первичным сопротивлением и потерями в железе¹⁾. Полный поток Φ_1 , который можно подсчитать если в уравнение (55) вместо ЭДС E_1 подставить напряжение у зажимов U_1 , равен величине $\overline{OE}$ и перпендикулярен к U_1 . Так как первичное напряжение не изменяется, то вектор $\overline{OE}$ при всех режимах работы останется неизменным по положению и по величине. При различных режимах работы меняются однако J_2 , а тем самым J_1 . Потоки рассеяния Φ_s и Φ_{s2} пропорциональны токам и должны быть нанесены параллельно последним. Величина Φ_s относится к J_1 как $\overline{FE}$ к $\overline{OP}$ и как $\overline{HE}$ к $\overline{OH}$. Точка H , как и точка E , неподвижна. При холостом ходе $J_1 = \overline{OH}$ и $\overline{HE}$ — первичный поток рассеяния, вызываемый током холостого хода. Так как при всех нагрузках векторы $J_2 \cdot r_2$ и J_2 имеют одно и то же направление, то поток Φ_2 будет всегда перпендикулярен к $J_2 \cdot r_2$ и J_2 . Поэтому точка G лежит на полуокружности ниже $\overline{OH}$.

Однако, если G находится на окружности, то на окружности должна быть расположена и точка P . Точка K получается от пересечения продолжения прямой $\overline{OE}$ с прямой, параллельной $\overline{OG}$ и проведенной через точку P . Точка F лежит всегда вместе с концом на окружности с диаметром $\overline{LN}$. Взяв разность векторов J_1 и J_m , мы получим вектор $\overline{PF}$ — величину вторичного тока J_2 в масштабе первичного тока. Умножив J_2

¹⁾ M. Liwischitz. Die elektrischen Maschinen. Verlag B. G. Teubner, 1928.

Без сопротивления в цепи ротора двигатель с коротко-замкнутой обмоткой не мог бы быть пущен в ход. Если желательно определить момент вращения для какой-либо точки нагрузки, то необходимо выразить в миллиметрах в ур. (74) расстояние точки окружности от прямой моментов вращения.

$$D_n = m \cdot U_1 \cdot x \cdot \frac{60}{2\pi \cdot n_s \cdot 9,81} \cdot \overline{PB} \text{ кгм} \quad (74)$$

где x — масштаб тока.

Для определения полезного момента вращения необходимо от полученного момента вычесть момент от потерь на трение в подшипниках и о воздух.

Линия $\overline{SP_K}$ называется линия мощностей. Величине $\overline{PA}$ в миллиметрах соответствует отданная мощность без потерь на трение для нормальной точки нагрузки

$$N_2 = m \cdot U_1 \cdot x \cdot \overline{PA} \text{ ватт.} \quad (75)$$

Величина $\overline{PC}$, следовательно, расстояние точки P от оси абсцисс, является мерой для активной мощности, воспринятой при нормальной нагрузке, величина же $\overline{OC}$ дает реактивную мощность, воспринятую при нормальной нагрузке.

Проведя к окружности касательную, параллельную прямой, мы получим максимальные значения мощностей и момента вращения. Прямая касается абсциссы в точке P_3 , так что $\overline{P_3C_3}$ соответствует максимально воспринятой мощности. Максимальный момент вращения, который может быть отдан двигателем, пропорционален величине $\overline{P_2B_2}$, тогда как максимально отдаваемая мощность соответствует точке P_1 .

Из круговой диаграммы можно также графически получить и число оборотов. Для этого выбирают на нижней половине окружности какую-либо точку D и соединяют ее с точками P_∞ , P_K и S . К прямой $\overline{DP_\infty}$ проводят на некотором расстоянии параллельную, например $\overline{Q_3Q_K}$. Точке Q_K будет тогда соответствовать неподвижное состояние двигателя, а точке Q_3 будет соответствовать синхронный бег. Для точки нагрузки P можно отсчитать скольжение, так как $\overline{Q_3Q_K}$ делится равномерно.

Круговая диаграмма оказывает неоценимую услугу прежде всего при определении способности к перегрузке. Согласно нормам (REM 23), способность к перегрузке должна составлять по меньшей мере 1,6-кратную величину от нормальной мощности. Нормальной нагрузке соответствует длина $\overline{PA}$. Способность к перегрузке относят поэтому к нормальной мощности $\frac{\overline{P_1A_1}}{\overline{PA}}$: Способность к перегрузке, отнесенная к моменту $\frac{\overline{P_2B_2}}{\overline{PB}}$ больше, чем способность к перегрузке, отнесенная к отданной мощности, так как число оборотов падает.

В нормальной точке нагрузки желателен также возможно более благоприятный $\cos \phi$. Наиболее благоприятный коэффициент мощности получается в точке прикосновения с окружностью касательной, проведенной из точки O .

Область работы генератора находится в нижней части круговой диаграммы между S и K .

§ 8. Испытание трехфазного асинхронного двигателя.

Готовая машина перед отправкой из завода всегда подвергается испытанию, состоящему для асинхронной машины из измерений сопротивления, холостого хода и короткого замыкания. Из этих измерений может быть косвенно определен коэффициент полезного действия при каждой нагрузке. Особенно при благоприятных коэффициентах полезного действия может быть таким путем достигнут результат, значительно более точный, чем при определении коэффициента полезного действия по непосредственному методу. По последнему методу мощность или отдается второй машине, коэффициент полезного действия которой при работе ее генератором должна быть известна, или же определяет отдаваемую мощность при помощи тормоза, дающего возможность находить отдаваемый момент вращения.

На табличке испытанного трехфазного асинхронного двигателя были указаны следующие данные:

$$N_2 = 7,5 \text{ kW},$$

$$U_{1\lambda} = 380 \text{ вольт при соединении звездой},$$

$U_{20\lambda} = 138 \text{ вольт при соединении звездой и открытой обмотке ротора при неподвижном состоянии}.$

$$J_1 = 16 \text{ амп.}, n_2 = 1440 \text{ об./мин.}, f_1 = 50 \text{ пер./сек.}, \cos \varphi_1 = 0,85.$$

Перед началом измерений машина была испытана в смысле ее механического вращения, наложения щеток и т. п.

Сопротивление определяется или при помощи постоянного тока по непосредственному методу из измерений тока и напряжения, или же находится при помощи мостика Томсона. При подсчете коэффициента полезного действия следует однако учитывать нагретое сопротивление. Так как испытание при полной нагрузке редко может быть произведено до достижения конечной температуры, то сопротивление в нагретом состоянии должно быть пересчитано на 75°C согласно нормам (REM 23).

В нашем случае сопротивление отдельных фаз при 20°C составляло: для обмотки статора:

$$r_c = 0,504 \Omega; r_s = 0,508 \Omega; r_w = 0,51 \Omega,$$

а для ротора:

$$r_c = 0,107 \Omega; r_s = 0,106 \Omega; r_w = 0,105 \Omega.$$

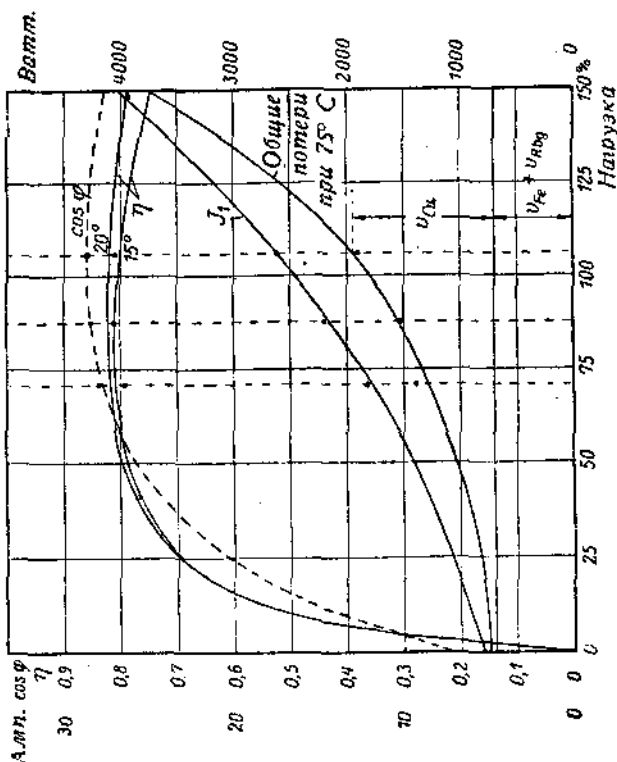
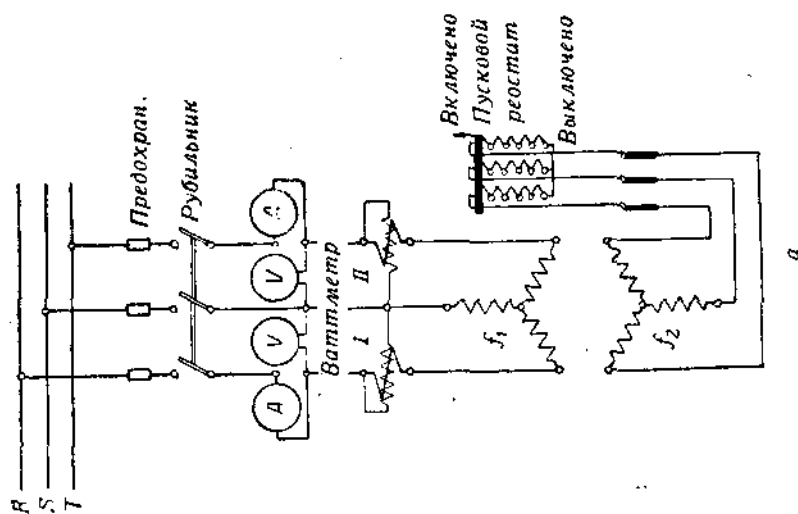
В качестве среднего значения из этих измерений при 75°C (температурный коэффициент = 0,004) сопротивление одной фазы получается равным: для статора $r_1 = 0,62 \Omega$ и для ротора $r_2 = 0,1295 \Omega$.

При опыте холостого хода и короткого замыкания мощность измерялась так, как указано на схеме фиг. 283, т. е. способом двух ваттметров. Кроме того ток измерялся в двух фазах при помощи двух амперметров, а междупазовое напряжение — при помощи двух вольтметров. Из измерения холостого хода при 380 вольтах получалось:

$$J_{10} = 5,2 \text{ амп.}; \text{ ваттметр I} = 1350 \text{ ватт}; \text{ ваттметр II} = -620 \text{ ватт};$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{1350 - 620}{5,2 \cdot \sqrt{3} \cdot 380} = 0,213.$$

Потери в меди при холостом ходе составляют $V_{\text{св}} = m_1 \cdot J_{10}^2 \cdot r = 40 \text{ ватт}$ при температуре обмотки в 20° . После измерения холостого хода результат



Фиг. 283. Схема и кривые трехфазного асинхронного двигателя.

по ваттметру был отчитан сразу после размыкания цепи ротора, но при полном числе оборотов. Было отсчитано 380 ватт. Разность потерь, следовательно, $730 - 40 - 380 = 310$ ватт, составляет приблизительно потери от трения в машине.

Опыт короткого замыкания был выполнен по той же схеме. При междуфазовом напряжении в 109 вольт ток короткого замыкания равнялся 15,8 амп. После пересчета на 380 вольт длительный ток короткого замыкания получается равным:

$$J_K = 15,8 \frac{380}{109} = 55 \text{ амп.}$$

Ваттметры показывали: ваттметр I = 1 250 ватт; ваттметр II = — 400 ватт.

$$\cos \varphi_K = \frac{1\,250 - 400}{15,8 \cdot \sqrt{3} \cdot 109} = 0,285.$$

Кроме того, при неподвижном состоянии машины и при разомкнутой обмотке ротора было измерено напряжение между двумя контактными кольцами. При первичном напряжении в 380 вольт между двумя контактными кольцами измерения показывали всегда 138 вольт. Коэффициент полезного действия может быть определен теперь для каждой нагрузки. В нижеприводимой таблице даются значения, необходимые для определения коэффициента полезного действия, полученные частью из построенной круговой диаграммы. На фиг. 283б эти значения представлены в виде кривых.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Нагрузка	0%	25%	50%	75%	100%	125%	150%	
Отданная мощность N_2	0	1,88	3,75	5,6	7,5	9,4	11,3	kW
J_1	5,2	6,7	9,3	12,5	16,4	21,2	26,6	амп.
$\frac{J_2}{\cos \varphi_1}$ } взято из круговой диаграммы	0	10	19	28,5	38,5	50	64	амп.
	0,213	0,61	0,775	0,84	0,86	0,853	0,83	
$V_{Cu_1} = J_1^2 \cdot 3 \cdot 0,62$	50	83	161	290	500	840	1 320	ватт
$V_{Cu_2} = J_2^2 \cdot 3 \cdot 0,1295$	—	39	140	315	575	970	1 590	ватт
$V_{Fe} + V_{Bog} - V_{Cu \text{ хол.}}$	690	690	690	690	690	690	690	ватт
Согласно нормам (REM 23) добавочные потери 0,5% от $N_1 = 100\%$, изменяются с квадратом тока	—	8	15	27	45	75	120	ватт
Сумма потерь	740	820	1 006	1 322	1 810	2 575	3 720	ватт
$\eta = \frac{N_2}{N_2 + \text{потери}}$	0	0,695	0,79	0,81	0,805	0,785	0,75	при темпер. обм. в 25° C
η	0	0,7	0,795	0,82	0,825	0,81	0,78	при темпер. обм. в 20° C

Максимальный коэффициент полезного действия будет при нагрузке, при которой потери в меди равны остальным потерям. Максимальная мощность двигателя N_2 составляет приблизительно 12,2 kW, следовательно способность к перегрузке, выраженная относительно нормальной мощности, будет приблизительно 1,63. Способность к перегрузке, отнесенная к моменту, благодаря увеличению падения числа оборотов до опрокидывающей нагрузки, выразится приблизительно в 1,92.

Кроме того, для проверки подсчета коэффициента полезного действия холодная машина, соединенная по той же схеме (фиг. 283а), подвергалась торможению.

$P_{\text{кз}}$	J_1	n	Ваттметр		N_2	$\cos \varphi$	η	Потери
			$I(N_I)$	$II(B_{II})$				
18,2	12,2	1 450	4,6	2,1	5,31	0,84	0,791	1 390
22,5	14,6	1 445	5,5	2,6	6,55	0,85	0,809	1 550
27,5	17,3	1 430	6,6	3,2	7,93	0,853	0,809	1 870

Сила трения P действовала на тормозной диск с длиной окружности в 1,231 м. Мы получаем:

$$N_2 = \frac{P \cdot 1,231 \cdot n}{60} \cdot 9,81 \text{ ватт.}$$

Величина $\cos \varphi_1$ была найдена по формуле Брейтфельда (Breitfeld) из $\text{tg } \varphi$:

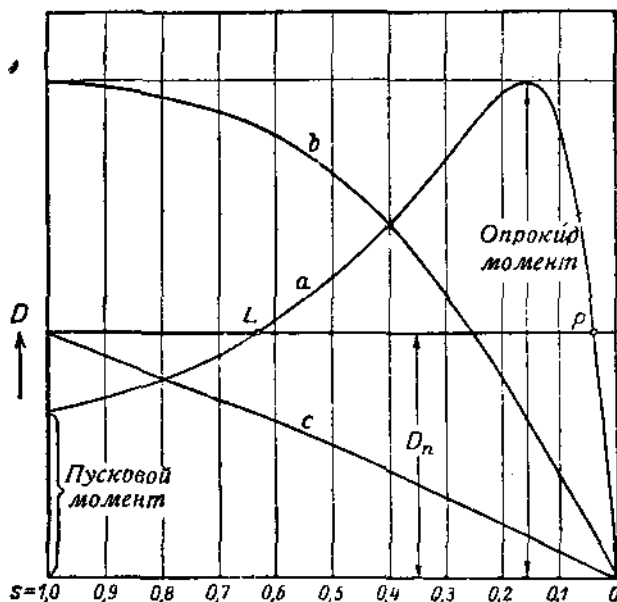
$$\text{tg } \varphi = \sqrt{3} \cdot \frac{N_I - N_{II}}{N_I + N_{II}}.$$

Измеренные значения также нанесены на диаграмме.

§ 9. Момент вращения и устойчивость двигателя. Влияние величин U_1 , ω и f_1 на круговую диаграмму.

Нормальный момент вращения двигателя получается из ур. (74). Нанеся величину момента вращения при отдельных числах оборотов, мы получим кривую a на фиг. 284. При определенном скольжении, колеблющемся большей частью между $s = 0,08 - 0,4$ (первая величина действительна для больших машин, а вторая величина — для очень малых машин), возникает максимальный момент вращения. Если в цепь ротора двигателя включается еще сопротивление через контактные кольца, то с увеличением сопротивления точка P_K (фиг. 282) передвинется по дуге $P_K S$. Так как однако точке P_K соответствует неподвижное состояние, то точка Q_K для $s = 1$ также передвинется по прямой скольжения и отдельным точкам окружности между новой точкой Q_K и S будут соответствовать другие значения скольжения. Таким образом путем введения соответствующих сопротивлений в цепь ротора можно получить любой пусковой момент между максимальным моментом вращения и нулевым. Кривая b соответствует пуску при максимальном моменте, а кривая c — пуску при нормальном моменте. Кроме того преимущества, что при помощи сопротивлений в цепи ротора удастся получить любое значение пускового момента, следует отметить и то обстоятельство, что при пуске уменьшается величина первичного тока.

Для пуска разумеется необходимо, чтобы момент вращения двигателя был больше, чем преодолеваемый момент нагрузки. Преобладание момента двигателя придает ускорение как последнему, так и приводимой в движение машине. Устойчивое состояние получается тогда, когда момент нагрузки равен моменту двигателя и когда при возрастании числа оборотов момент нагрузки возрастает быстрее, чем момент двигателя, тогда как при уменьшении числа оборотов момент двигателя должен стать больше, чем момент нагрузки, так что остается ускоряющий момент. Если для приводимой в движение машины требуется постоянный нормальный момент D_n (фиг. 284) при всех числах оборотов, то двигатель сможет устойчиво ра-



Фиг. 284. Момент вращения трехфазного асинхронного двигателя.

ботать без добавочных сопротивлений в цепи ротора только в точке P . Точка L — неустойчивая точка, в которой вышеописанное условие не выполняется. Максимальный момент называется также опрокидывающим моментом, так как при увеличении момента нагрузки до этих пределов двигатель не может продолжать свое вращение и останавливается.

С изменением приложенного напряжения меняется диаметр окружности. Последний равен приблизительно $J_k - J_0$. Так как ток короткого замыкания меняется пропорционально напряжению, а ток холостого хода в зависимости от насыщения железа меняется по отношению к напряжению более резко, чем по

простой пропорциональности, то диаметр круга будет меняться несколько слабее, чем пропорционально величине U_1 . Способность к перегрузке, следовательно отношение опрокидывающего момента к неизменному номинальному моменту, изменяется почти пропорционально квадрату напряжения. Вследствие такой чувствительности к напряжению, а также и благодаря изменяющемуся распределению потерь нормами (REM) установлено допустимое колебание напряжения в $\pm 5\%$.

На способность к перегрузке такое же влияние, как и напряжение, оказывает и изменение числа витков.

При выборе числа витков, при заданных напряжении и размерах машины, проектирующий инженер имеет лишь одну возможность, а именно — воздействовать на индукцию в воздушном зазоре и, следовательно, на способность к перегрузке. Чем меньше число витков, тем больше ток короткого замыкания и способность к перегрузке. С увеличением напряжения или с уменьшением числа витков при той же отдаче активной мощности увеличивается воспринятая реактивная мощность, так что $\cos \varphi$ ухудшается.

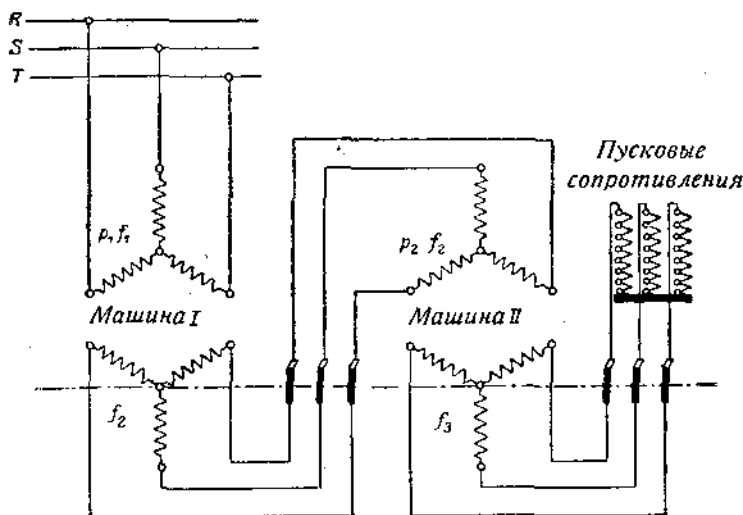
Если одновременно увеличиваются или уменьшаются число периодов (в пределах от 40—60 периодов) и напряжение двигателя в 50 периодов и поток, следовательно, остается тем же, то может быть отдана мощность,

также возрастающая или убывающая пропорционально этим значениям. Преимущество, заключающееся в понижении потерь в железе при уменьшении числа периодов, приблизительно уравнивается тем недостатком, что с уменьшением числа оборотов ухудшаются условия охлаждения. При неизменном напряжении машина может применяться для чисел оборотов, отличающихся от нормального на $\pm 5\%$.

§ 10. Регулировка числа оборотов асинхронного двигателя.

Регулировка числа оборотов при помощи сопротивлений в цепи ротора возможна только в сторону уменьшения. Чем сильнее отклоняется число оборотов от синхронного тем большая электрическая мощность $N_{\text{с}}$ должна быть израсходована в сопротивлениях цепи ротора и тем неэкономичнее регулировка.

Кроме того, пусковое сопротивление должно быть рассчитано так, чтобы оно могло воспринять соответствующие тепловые потери. Такой способ регулировки будет еще достаточно экономичным тогда, когда требуется момент, уменьшающийся пропорционально квадрату числа оборотов, как, например, в компрессорных и вентиляторных установках, так как с уменьшением числа оборотов расходуемая „мощность скольжения“ $N_{\text{с}}$ очень быстро уменьшается.



Фиг. 285. Регулировка числа оборотов при помощи каскадного соединения двух трехфазных асинхронных двигателей.

В машине с переключением полюсов первичная обмотка может быть переключена на два, а иногда и на несколько разных чисел полюсов, что дает различные синхронные числа оборотов. Наиболее простое переключение полюсов — это переключение в отношении один к двум. Так как число витков при этом меняется, то необходимо, кроме того, выбирать для большего числа полюсов соединение треугольником, а для меньшего числа полюсов — соединение звездой. Несмотря на это, поток в обоих случаях не будет одинаковым; это обстоятельство, а также плохой коэффициент мощности и необходимость четырехполюсного переключателя понижают экономичность и использование машины. В малых машинах встречаются также две отдельные обмотки с различным числом полюсов. Для тонкой регулировки приходится, кроме того, прибегнуть к помощи сопротивлений.

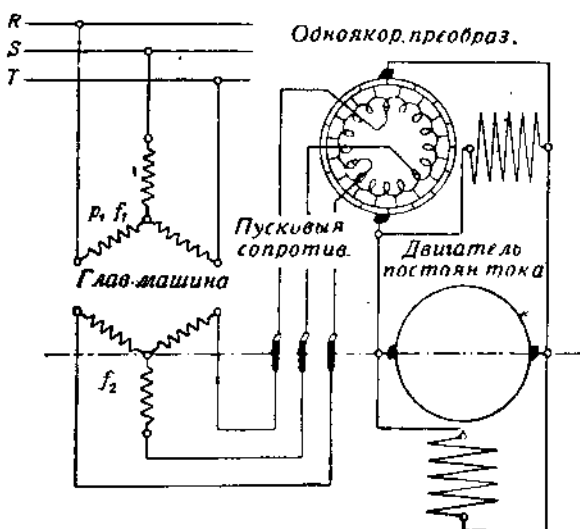
При каскадном соединении (фиг. 285) два трехфазных асинхронных двигателя соединяются между собою механически и электрически. Пусть p_1 и p_2 — числа пар полюсов в обеих машинах; синхронное число оборотов такого каскада выразится тогда:

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p_1 + p_2} = \frac{60 \cdot f_2}{p_2} \text{ об./мин.} \quad (76)$$

Статор или ротор одного двигателя (II) питается током от ротора другого двигателя (I), статор которого присоединен к сети с числом периодов f_1 . Число оборотов n_s равно, с точностью до скольжения (f_s , следовательно, очень мало), скорости в пространстве вращающегося потока второй машины. Обе машины могут работать каждая отдельно и между собою в каскадном соединении, что дает три синхронных числа оборотов. Так как поток при каскадном соединении должен создаваться дважды и ток

холостого хода вдвое больше, чем в отдельной машине, то коэффициент мощности получается плохим.

В мощных машинах или при необходимости постоянной регулировки в широких пределах энергии скольжения реализуется во вспомогательных машинах; при этом она или передается механически валу главной машины от сидящего с ней на одном валу агрегата, или же возвращается в сеть в виде электрической энергии при помощи электрически соединенного регулирующего агрегата после преобразования до соответствующего числа периодов.



Фиг. 286. Регулировка числа оборотов по схеме Кремера.

(фиг. 286) энергия скольжения подводится к одноякорному преобразователю, отдающему преобразованную мощность двигателю постоянного тока, сидящему на одном валу с главным двигателем. Этот агрегат может быть использован для регулировки числа оборотов только в сторону его уменьшения и применяется чаще всего для привода прокатных станков. Схема на фиг. 286 показывает принцип устройства без регулятора и добавочных аппаратов. Вместо машин постоянного тока в последнее время часто стали применять возвращение энергии скольжения через трехфазные коллекторные машины. В этом случае от коллектора вспомогательных машин подводится напряжение с необходимым числом периодов к ротору главной машины. Число оборотов ротора становится таким образом независимым от числа периодов первичной обмотки. Подобные агрегаты могут быть приспособлены как для работы с числом оборотов исключительно ниже синхронного, так и для работы с числом оборотов ниже и выше синхронного. Для того, чтобы машина переходила через синхронное число оборотов, необходимо питать обмотку ротора током с переменным числом периодов; проходящим через ноль.

Для достижения числа оборотов выше синхронного должно измениться направление вращающегося потока ротора относительно самого ротора. При числе оборотов ниже синхронного мощность направлена от главной машины к вспомогательной коллекторной машине, при гиперсинхронном числе оборотов — наоборот. Регулировка для работы с числом оборотов ниже и выше синхронного имеет то преимущество, что дорогие вспомогательные машины должны быть рассчитаны лишь на максимально встречающуюся мощность скольжения. Вспомогательные коллекторные машины могут быть выполнены, в зависимости от потребной регулировки, как серийные или как шунтовые трехфазные машины. Здесь также можно составить механически или электрически соединенный регулирующий агрегат. Вспомогательными машинами можно значительно улучшить коэффициент мощности главной машины ¹⁾.

§ 11. Асинхронная машина с коротко-замкнутым ротором.

Асинхронный двигатель с коротко-замкнутым ротором является самой дешевой и простой электрической машиной. Он требует очень незначительного ухода и весьма надежен в работе. Относительно редкое применение объясняется большим током включения, вызывающим колебания света в одновременно горящих лампах. Мгновенный ток при включении, как и в трансформаторе, в первой полувольте будет приблизительно в два раза больше, чем длительный ток короткого замыкания I_K в круговой диаграмме.

Если от коротко-замкнутого ротора требуются ускорения для больших маховых масс, как, например, для приведения в движение центрофуг, то большим недостатком является то обстоятельство, что ротор при этом может лишь с трудом воспринять энергию, которая должна быть уничтожена во вторичной обмотке. Как это следует из ур. (66), (67) и (68), при пуске в ход половина мощности N_{12} , переданной ротору, должна восприниматься обмоткой ротора как электрическая энергия. В то время как у двигателя, имеющего ротор с контактными кольцами, большая часть этой мощности воспринимается пусковым сопротивлением, при коротко-замкнутом роторе вся теплота должна восприняться вторичной обмоткой. Поэтому для таких случаев, в особенности при частых пусках, коротко-замкнутый ротор получается больших размеров, чем ротор с контактными кольцами ²⁾.

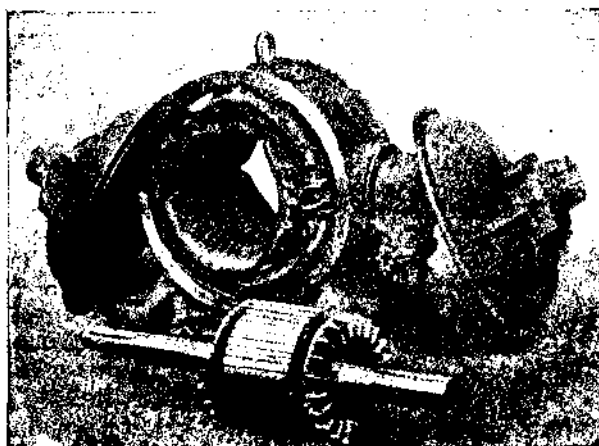
Для уменьшения пускового тока пользуются различными способами. Для того, чтобы потери в роторе во время работы были незначительными, сопротивление ротора не должно быть слишком большим; поэтому пусковой момент при коротко-замкнутых роторах бывает обычно меньше нормального момента. Для привода отдельных рабочих машин нормальный момент, однако, оказывается ненужным. В этих случаях или понижают напряжение у зажимов при помощи пусковых трансформаторов (для больших машин), или же двигатель, рассчитанный для соединения треугольником, приключают к сети при соединении звездой (для малых машин). При помощи переключателя с треугольника на звезду фазовое напряжение при пуске понижается, следовательно, в $\sqrt{3}$ раза; при этом пусковой ток и пусковой момент уменьшаются до одной трети. При применении скользящей муфты двигатель пускается в ход без нагрузки и лишь затем, близко к синхронизму, двигатель увлекает за собою ременный шкив или машину;

¹⁾ J. Kozisek. Drehstromregelsätze mit Läuferfremderregung. ETZ, 1926.

²⁾ R. Rüdenberg. Der Anlaufvorgang bei Asynchronmotoren mit Kurzschlussläufern. Elektrotechnik und Maschinenbau, 1919.

здесь пусковой ток все же не уменьшается. Для приведения в движение центрофуг и для установок, требующих частых пусков, скользящая муфта все же выгодна, так как она даст возможность уменьшить количество тепла, расходуемое в роторе при пуске.

Очень многие патенты пытаются разрешить вопрос о повышении пускового момента и уменьшении пускового тока другими путями. Центро-



Фиг. 237. Разобранный трехфазный асинхронный двигатель с ротором, в котором для пуска используются вихревые токи в проводах.

бежные выключатели, включающие сопротивления в цепь ротора, уменьшают надежность и простоту установки. Рихтер с успехом применяет для пуска двигателей с коротко-замкнутыми роторами две последовательно соединенные обмотки в статоре с различными числами полюсов. Ротор также имеет особое беличье колесо ¹⁾.

Для ротора, в котором по предложению Рюдена-Берга используются вихревые токи, применяются в качестве проводов (фиг. 287) особенно высокие стержни. В неподвижном состоянии при большом числе периодов возникает сильное вы-

теснение тока, благодаря чему увеличивается активное сопротивление проводов ротора. Вследствие вытеснения тока, к тому же связанного с уменьшением рассеяния ротора, сдвигается точка короткого замыкания в круговой диаграмме и окружность искажается. С возрастанием числа оборотов действие вытеснения тока постепенно ослабляется. Таким образом достигается одновременно и увеличение пускового момента и уменьшение пускового тока ²⁾.

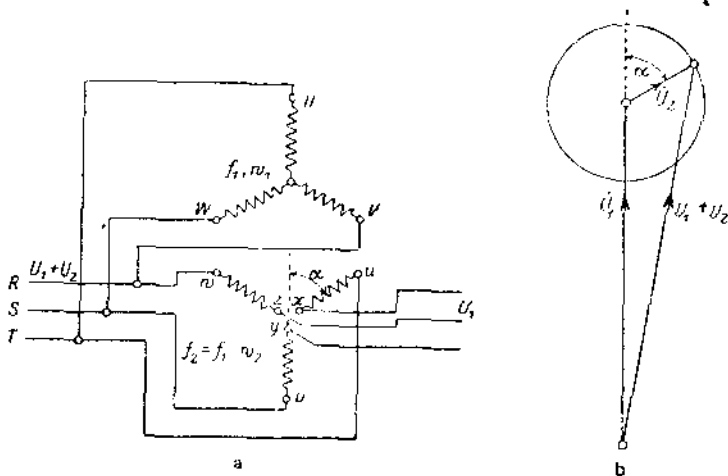
§ 12. Вращающийся трансформатор, преобразователь числа периодов и каскадный умформер.

Вращающийся трансформатор представляет собою асинхронную машину в неподвижном состоянии. Его схема аналогична схеме автотрансформатора (фиг. 288а) с той лишь разницей, что часть витков (чаще всего та, к которой должно подводиться напряжение) устраивается вращающейся. Вращающийся трансформатор служит для регулировки напряжения в одно- и многофазных преобразователях и в сетях. Первичная обмотка, как и в каждом трансформаторе, присоединена к полному напряжению сети; эта обмотка приключается с той стороны вращающегося трансформатора, с которой напряжение постоянно. Во вторичной обмотке индуцируется напряжение U_z , которое можно определить (пренебрегая падениями напряжения) по коэффициенту трансформации y_m . Если середины катушек первичной и вто-

¹⁾ Richter, ETZ, 1925. Heft 1.

²⁾ M. Liwschitz. Der Anlauf- und Bremsvorgang bei Asynchronmotoren mit Wirbelstromläufern. Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens-Konzern, Band IV, 1925, Verlag J. Springer, Berlin.

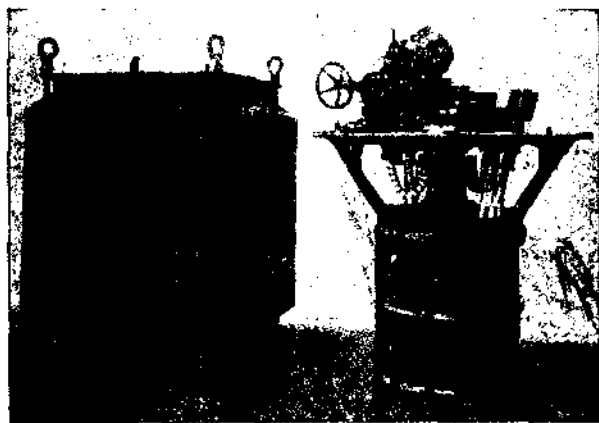
ричной стороны совпадают, то первичный поток может быть или усилен, или ослаблен вторичным потоком; в зависимости от этого отданное напряжение будет $U_1 + U_2$ или $U_1 - U_2$. Между этими двумя крайними положениями может быть установлено любое напряжение соответственно величине



Фиг. 288. Схема вращающегося трансформатора.

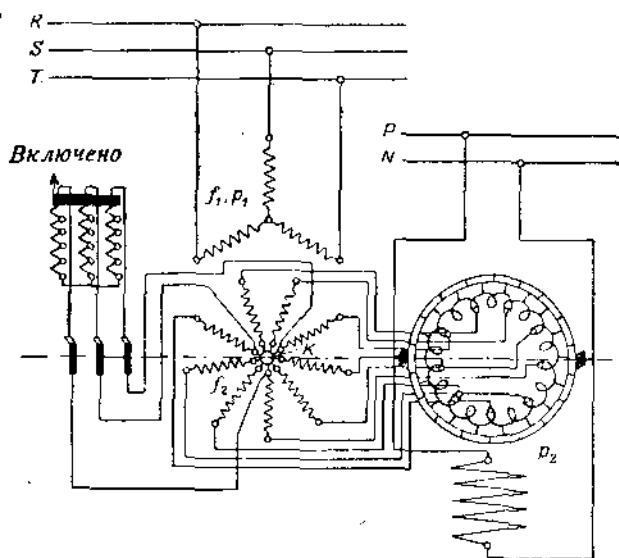
результатирующего потока. Регулировка напряжения очень часто осуществляется автоматически. В этом случае подвижная часть передвигается при помощи вспомогательного двигателя, установленного на крышке кожуха (фиг. 289). Движению вращающейся части препятствует самотормозящийся червяк. При двойном вращающемся трансформаторе устроены два трансформатора на одном валу и соединены между собою так, что их моменты взаимно уничтожаются.

В преобразователе число периодов от вторичной части машины получают электрическую мощность желательного числа периодов. Если требуется электрическая мощность N_e , с числом периодов меньшим, чем с первичной стороны, то машина должна вращаться с соответствующим числом оборотов, меньшим синхронного. Механическая мощность N_m должна восприниматься второй машиной с другим числом оборотов и может быть отдана обратно в сеть. Преобразователь числа периодов для отдачи одной и той же электрической мощности будет тем более мощным, чем меньше вторичное число периодов, так как N_m становится тогда значительным. Вторичное число периодов становится больше первичного тогда, когда машина приводится в движение против направления



Фиг. 289 Вращающийся трансформатор, вынутый из масляного кожуха.

вращающегося потока. В этом случае машине должна быть подведена механическая мощность, которая должна быть тем больше, чем выше вторичное число периодов. Последнее будет в два раза больше первичного числа периодов тогда, когда число оборотов привода будет в точности равно и противоположно числу оборотов вращающегося потока. В этом случае мощность, передаваемая через первичную обмотку во вторичную, будет такая же как та часть мощности, которая должна механически подводиться от приводной машины. В то время как потери в меди подводятся от первичной обмотки, большая часть потерь в железе и потери от трения в преобразователе числа периодов должны полностью покрываться приводной машиной. Недостатком асинхронного преобразователя числа периодов является сильное падение напряжения при возрастании вторичной нагрузки (до 40%) благодаря большим реактивным сопротивлениям рассеяния. Индукции, в особенности во вторичной части, должны быть малы из-за высоких потерь в железе.



Фиг. 290. Схема каскадного преобразователя.

При каскадном преобразователе (фиг. 290) соединены между собою электрически и механически ротор асинхронной машины и якорь машины постоянного тока. Обмотка асинхронного ротора получает через первичную часть электрическую мощность N_1 с числом периодов, соответствующим числу оборотов. Эта в большинстве случаев 9- или 12-фазная обмотка подводит электрическую мощность обмотке постоянного тока, имеющей ответвления в соответствующих местах. Как и при каскадном соединении двух трехфазных двигателей, число

оборотов и здесь определяется ур. (76), при чем p_1 и p_2 — числа пар полюсов асинхронной машины и стороны постоянного тока. Коэффициент полезного действия у каскадного преобразователя лучше, чем у мотор-генератора, так как в первом электрически преобразуется не вся мощность, а только часть ее; остальная же часть передается механически. Сторона постоянного тока работает, следовательно, частью как генератор постоянного тока, а частью как одноякорный преобразователь. Каскадный преобразователь связан синхронным числом оборотов и должен быть синхронизирован после пуска со стороны трехфазного тока. После синхронизации обмотка ротора замыкается накоротко при помощи замыкателя K , представленного на фиг. 290.

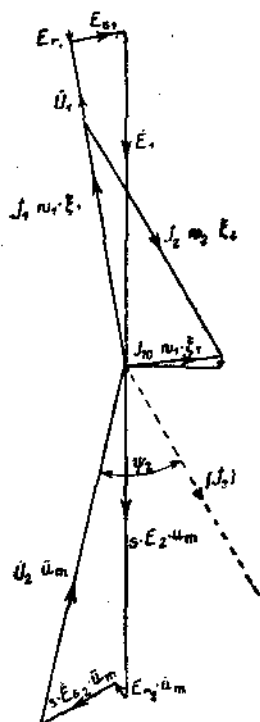
Регулировкой возбуждения стороны постоянного тока можно регулировать сторону напряжения постоянного тока в пределах $\pm 10\%$.

Перевозбуждением можно улучшить коэффициент мощности со стороны трехфазного тока.

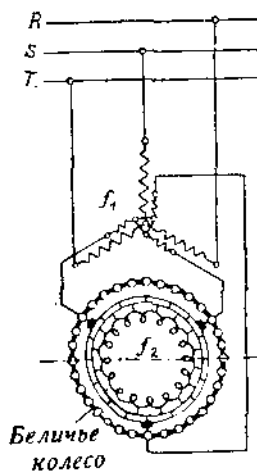
Каскадный преобразователь служит для преобразования переменного тока в постоянный.

§ 13. Компенсированные асинхронные машины.

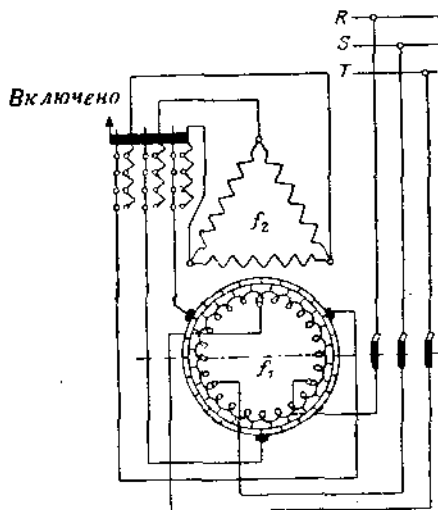
Свойство асинхронного двигателя, заключающееся в том, что ротору подводится реактивная мощность составляющая лишь $\frac{f_2}{f_1}$ часть от реактивной мощности статора, было впервые использовано в послевоенные годы для строившихся в изобилии асинхронных машин с компенсацией фаз. При $\cos \varphi_1 = 1$ току в роторе должен быть дан угол сдвига фаз Ψ_2 (фиг. 291). Для того, чтобы первичная обмотка отдавала реактивную мощность, угол сдвига фаз между U_2 и I_2 должен еще больше увеличиться. Следствием такого сдвига фаз тока в роторе является то, что, вопреки неизменному напряжению у зажимов U_1 , ЭДС машины увеличивается в сравнении с ЭДС при некомпенсированном режиме. Однако, с увеличением потока возрастает и индукция прежде всего в ярме и зубцах ротора, а также, при одинаковой отдаче активной мощности, и сама сила тока в роторе. С этими недостатками, однако, связано преимущество значительно лучшей способности к перегрузке.



Фиг. 291. Диаграмма времени для $\cos \varphi_1 = 1$.



а)



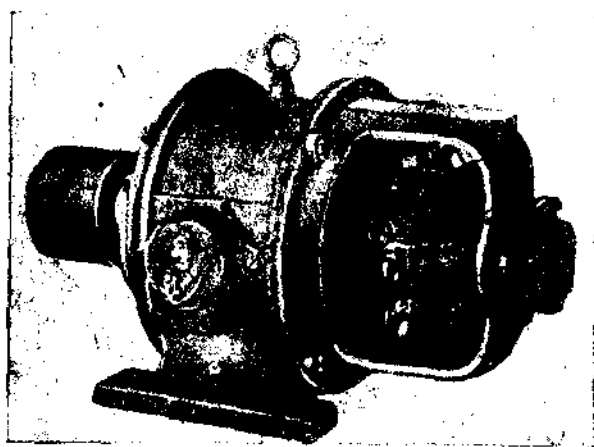
б)

Фиг. 292. Схема: а) двигателя Гейланда; б) двигателя Осноса.

Для компенсации применяются самые разнообразные схемы, во всех случаях, однако, необходим коллектор. Отдельные схемы, применяемые фирмой Сименс-Шуккерт, даны на фиг. 292а и б, 295а и б и 490. В больших установках и в распределительных сетях коэффициент мощности каждой отдельной машины может быть улучшен, так что вся распределительная сеть будет работать без реактивной нагрузки. Улучшение отдельных коэффициентов мощностей производится редко, так как гораздо экономичнее улучшить коэффициенты мощности нескольких двигателей при помощи одной большой машины с перекомпенсацией. Такое улучшение коэффициента мощности называется групповым улучшением. Обмен реактивной мощностью в этом случае имеет место между отдельными машинами, но не по отношению к источнику. При центральном улучшении

коэффициента мощности большая синхронная или асинхронная машина воспринимает суммарную реактивную мощность потребителей. Машины реактивной мощности устанавливаются на станции, или же на подстанции вблизи потребителей, благодаря чему генераторы, а также и линия передачи, разгружаются от реактивной мощности.

Двигатель Гейланда (фиг. 292а и 293) представляет собою двигатель с компенсированным коротко-замкнутым ротором; в этом двигателе момент вращения возникает так же, как и при коротко-замкнутом роторе. Статор, однако, имеет, кроме главной обмотки, присоединенной к сети, еще одну независимую вспомогательную обмотку с небольшим числом витков. Свободные концы этой трехфазной вспомогательной обмотки прикреплены к трем щеткам, расположенным друг относительно друга на 120 электрических градусов; через эти щетки подводится энергия, необходимая в незначительном количестве для возбуждения вспомогательной обмотки постоянного тока, имеющейся



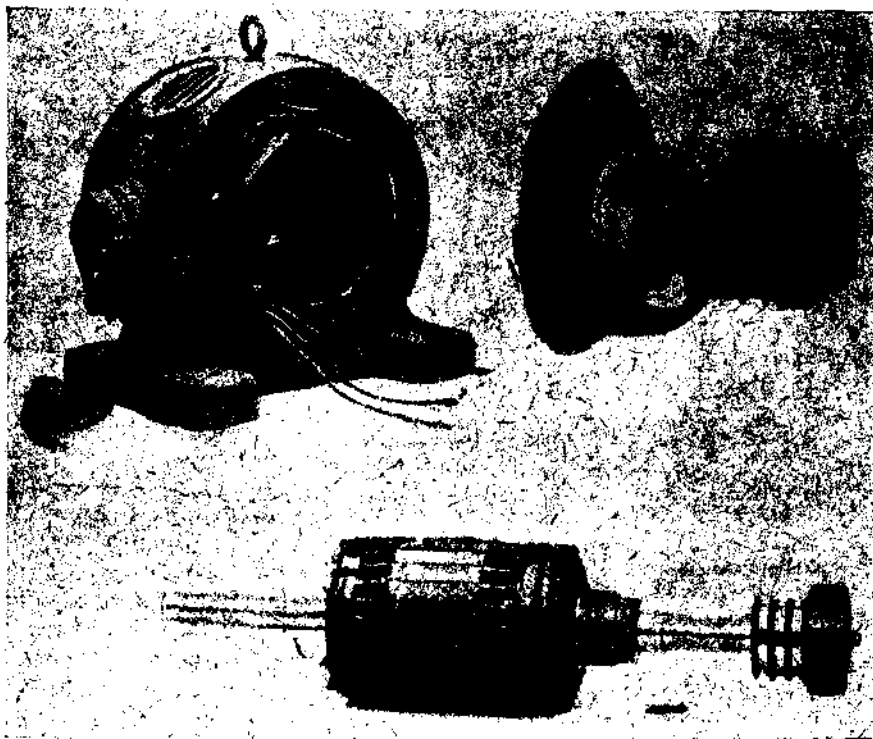
Фиг. 293. Двигатель Гейланда.

на роторе. Обмотка постоянного тока представляет собою обыкновенную, замкнутую на себя обмотку. При помощи коллектора энергия возбуждения с числом периодов статора преобразуется в энергию с числом периодов скольжения. При холостом ходе двигатель Гейланда, построенный для мощностей до 5,5 kW, отдает реактивную мощность в сеть.

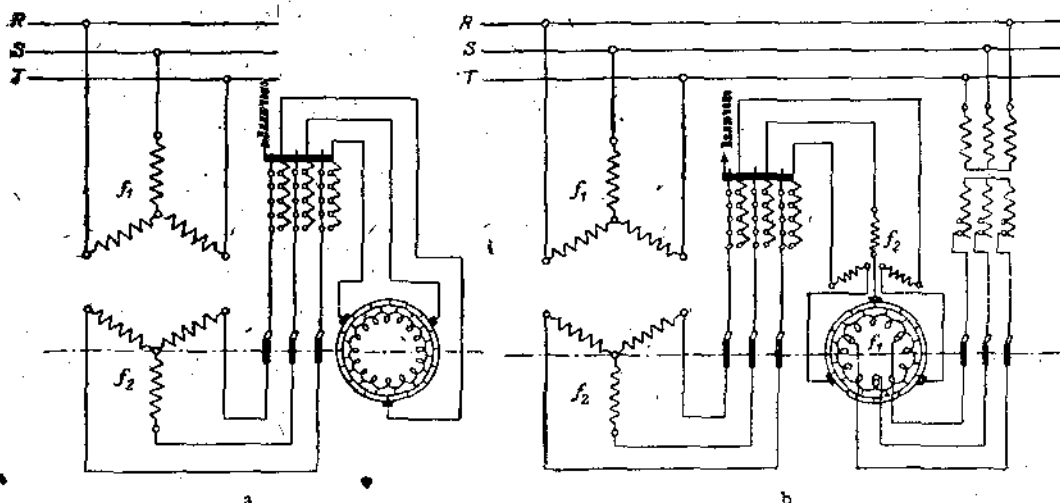
Двигатель Осноса (фиг. 292b и 294) строится фирмой Сименс-Шуккерт для мощностей от 7,5—50 kW. У этого двигателя первичная обмотка находится в роторе

и связана через три контактных кольца с сетью. В пазах ротора, кроме первичной обмотки, создающей поток, вращающийся относительно последней, имеется еще и замкнутая обмотка постоянного тока. В последней под действием вращающегося потока индуктируется ЭДС одинакового числа периодов. При помощи щеток, скользящих по коллектору, число периодов снова преобразуется, так что эта машина возбуждается со статора энергией с незначительным числом периодов при помощи трехфазной обмотки. Щетки сдвинуты друг относительно друга на коллекторе на 120 электрических градусов. Двигатель Осноса по своей схеме представляет собою трехфазный шунтовой коллекторный двигатель. Щетки расположены правильно тогда, когда при средней нагрузке имеет место синхронное число оборотов. При холостом ходе машина вращается гиперсинхронно и отдает реактивную мощность в сеть. При полной нагрузке, при которой $\cos \varphi = 1$, и при перегрузке число оборотов оказывается ниже синхронного. Как это видно из схемы 482b, пусковое сопротивление располагается между щетками коллектора и обмоткой статора. Для больших мощностей применяются возбуждательные машины трехфазного тока, установленные отдельно от асинхронной машины, или на одном валу с ней.

В трехфазных возбуждательных машинах с самовозбуждением (фиг. 295a, 296 и 297) последнее достигается токами ротора самой асинхронной

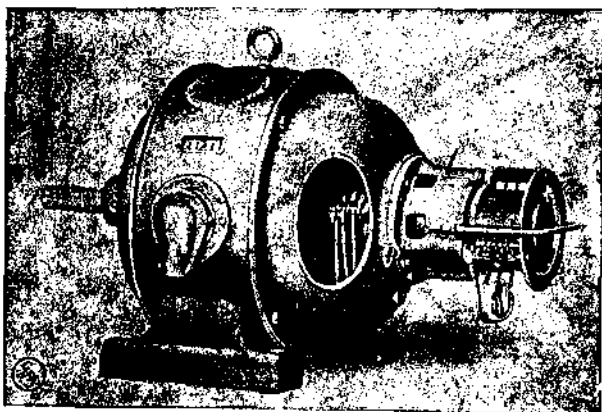


Фиг. 294. Двигатель Осноса в разобранном виде.



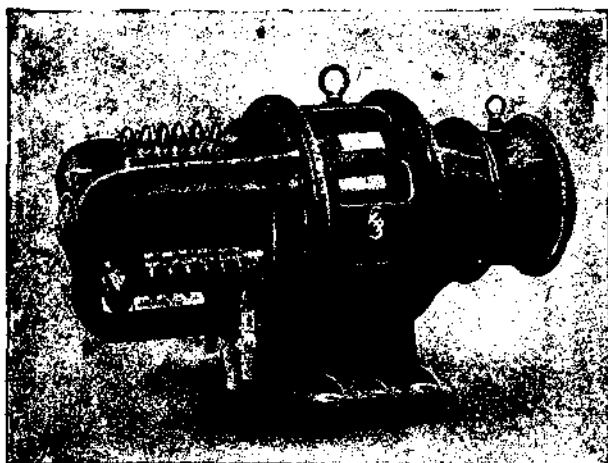
Фиг. 295. Схема асинхронной машины с трехфазной возбудительной машиной: а) собственного возбуждения; б) постороннего возбуждения.

машины. Вследствие этого асинхронная машина компенсируется не при холостом ходе, а только при нагрузке. Щетки коллектора, устанавливаемые одна относительно другой на 120 электрических градусов, соединены с ротором асинхронной машины. Обмотка постоянного тока у якоря возбуждательной машины является



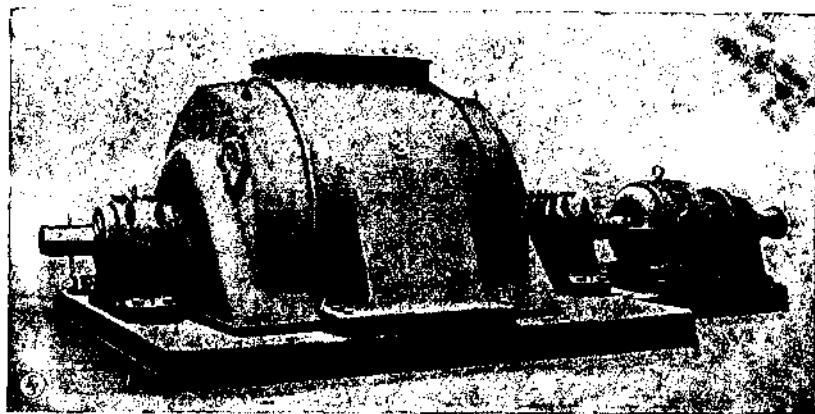
Фиг. 296. Асинхронный двигатель с пристроенной самовозбуждающейся трехфазной возбуждательной машиной.

одновременно „нулевой точкой“ обмотки ротора асинхронной машины. Неподвижная часть трехфазной возбуждательной машины не имеет ни пазов, ни обмотки. Благодаря токам ротора в возбуждательной машине создается вращающееся поле, передвигающееся с числом периодов скольжения относительно неподвижных щеток. Это вращающееся поле совершенно не зависит от направления вращения и от числа оборотов подвижной части возбуждательной машины и в неподвижном состоянии представляет собою добавочную активную и реактивную нагрузку для асинхронной машины. Если якорь возбуждательной машины приведен в движение в направлении вращения поля и если число оборотов машины равно числу оборотов вращающегося поля, то последнее будет неподвижно относительно проводов якоря. Однако, если якорь приобретает большую скорость, то провода якоря снова начнут пересекать вращающееся поле и в роторе трехфазного двигателя будет подводиться напряжение потребного направления. Возбуждательная машина или устанавливается на одном валу с двигателем (фиг. 296), или, для компенсации больших асинхронных двигателей, приводится в движение особым небольшим двигателем (фиг. 297). Это простое и дешевое компенсирование позволяет улучшить коэффициент мощности до $\cos \varphi = 1$. Если необходимо подводить также и опережающую реактивную мощность или исключительно реактивную мощность, то трехфазную возбуждательную машину следует возбудить от сети (в большинстве случаев через трансформатор возбуждения с несколькими ответвлениями со вторичной стороны) и предусмотреть, кроме коллектора, еще три кон-

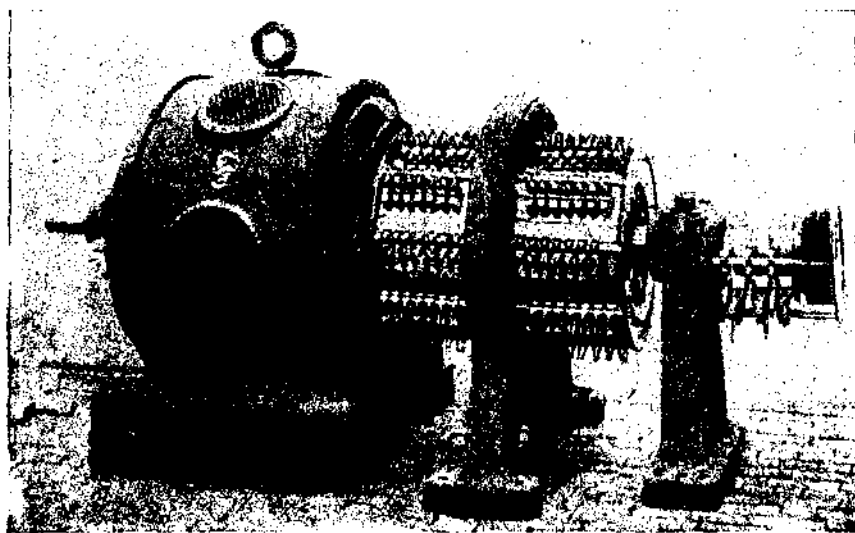


Фиг. 297. Трехфазная возбуждательная машина с пристроенным приводным двигателем.

тактных кольца (фиг. 299). Роль обмотки статора возбuditельной машины с посторонним возбуждением (фиг. 295b) сводится к понижению силы тока, полученного из сети через трансформатор возбуждения; она является компенсационной обмоткой ¹⁾.



Фиг. 298. Асинхронная машина с трехфазной возбuditельной машиной постороннего возбуждения.



Фиг. 299. Трехфазная возбuditельная машина с посторонним возбуждением.

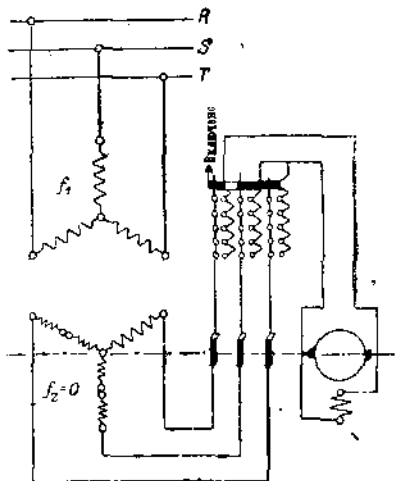
Для получения правильного числа периодов скольжения необходимо, чтобы возбuditельная машина была соединена глухой муфтой с главной машиной (фиг. 298) ²⁾.

Асинхронная машина с трехфазной возбuditельной машиной постороннего возбуждения пригодна также в качестве генератора; она требует

¹⁾ Dr. Schenkel. Neuere Fortschritte auf dem Gebiete der Asynchron-Generatoren und Asynchron Blindleistungsmaschinen. ETZ, 1925.

²⁾ J. Kozisek. Drehstromerregemaschinen mit Fremderregung. ETZ, 1925.

лишь небольшой синхронной машины для сохранения числа периодов. Преимущество асинхронной машины в качестве генератора в сравнении с синхронной машиной заключается в небольшом токе короткого замыкания (равном не 10—15-кратному, а лишь 6—8-кратному нормальному току) и в большой способности к перегрузке. В соединении с соответствующими вспомогательными машинами и добавочными аппаратами асинхронная машина в качестве генератора приобретет вероятно в будущем большое значение, так как ее нагрузочная характеристика в отличие от характеристики синхронной машины может получить любую форму¹⁾.



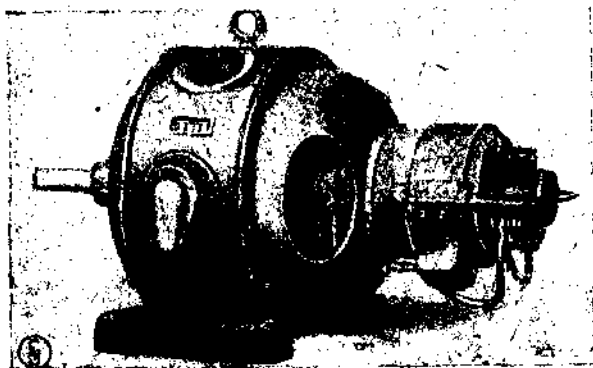
Фиг. 300. Схема синхронизированной асинхронной машины.

по возможности синусоидальной. Для этого целесообразно взять числа ампер-витков отдельных ветвей якоря равными между собою. Синхронизированный асинхронный двигатель пускается в ход как нормальный трехфазный двигатель.

При выпадении из синхронизма при перегрузках падает число оборотов, как в асинхронной машине; однако, опрокидывающий момент последней при этом может еще преодолеть большую нагрузку, тогда как в синхронной машине при $\cos \varphi = 1$ способность к перегрузке незначительна.

При перевозбуждении может быть отдана реактивная мощность, как в синхронном двигателе. Для этой цели напряжение возбуждательной машины постоянного тока должно регулироваться при помощи шунтового регулятора.

Синхронизированная асинхронная машина в последнее время получила широкое распространение.



Фиг. 301. Синхронизированный асинхронный двигатель с пристроенной возбуждательной машиной постоянного тока.

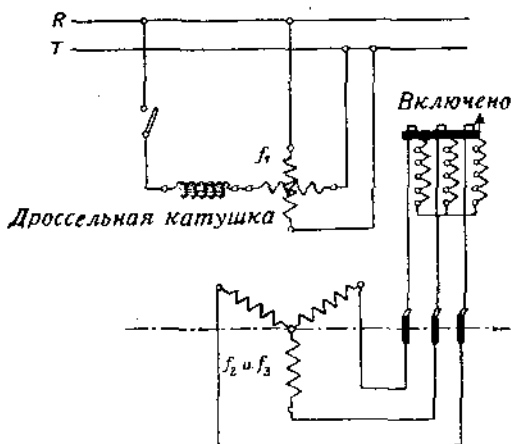
¹⁾ Dr. Schenkel. Neue Anwendungsmöglichkeiten asynchroner Grossmaschinen. ETZ, 1927.

§ 14. Однофазный асинхронный двигатель.

В однофазном асинхронном двигателе (фиг. 302) поток неподвижен в пространстве и меняет свою величину с изменением подведенного числа периодов. Поток может однако быть заменен двумя частичными потоками, бегущими в разные стороны с одинаковыми скоростями, амплитуды которых равны половине амплитуды основного потока. Число оборотов в пространстве этих частичных потоков определяется из числа периодов и числа полюсов по ур. (46). При неподвижном состоянии моменты вращения, созданные обоими потоками при замкнутой цепи ротора, взаимно уничтожаются. Для пуска требуется поэтому вспомогательная обмотка, сдвинутая на 90 электрических градусов относительно главной обмотки и уложенная в открытые пазы (ч. II, В, § 1). Если вспомогательную катушку последовательно с дроссельной присоединить к сети параллельно главной катушке, то в первой потечет ток с другим углом сдвига фаз, чем в последней. Таким образом, возникает вращающееся поле, амплитуда которого, однако, в противоположность амплитуде вращающегося поля при многофазных токах, представляет собою сильно меняющуюся величину: вращающееся поле будет меняться не по окружности, а по эллипсу. После установления нормального числа оборотов машины вспомогательная обмотка выключается.

В однофазном двигателе главная обмотка может создать момент вращения лишь после того, как ротор приведен в движение в любое направление. В многофазной системе на ротор действует в направлении вращения потока неизменный и одинаково направленный момент, тогда как здесь момент вращения имеет переменные направление и величину. Однофазный двигатель больше подвержен качаниям. Частичный поток, являющийся действующим потоком благодаря выбору определенного направления вращения, — этот „главный поток“, создает тем больший момент вращения, чем ближе число оборотов ротора к синхронному. Однофазному двигателю, так же как и трехфазному, свойственен максимальный момент вращения — опрокидывающий момент. Частичный поток, бегущий против направления вращения, так называемый „инверсный“ поток, ослабляет момент вращения главного потока, главным образом при низких числах оборотов. Для однофазного асинхронного двигателя можно построить круговую диаграмму, аналогичную диаграмме многофазной машины; свойства двигателя все же от нее несомненно отличаются. При включении сопротивления в цепь ротора скольжение меняется незначительно. Включение сопротивления в цепь ротора понижает, однако, величину опрокидывающего момента, что не имеет места в трехфазном двигателе.

Сопротивление в цепи ротора на фиг. 302 служит только для понижения пускового тока. Как и в многофазном асинхронном двигателе, характеристика числа оборотов здесь будет шунтовой.



Фиг. 302. Схема однофазного асинхронного двигателя.

Под действием обоих частичных потоков в роторе индуцируется ток. Ток, созданный главным потоком, имеет число периодов скольжения $f_2 = f_1 \cdot \frac{n_s - n_2}{n_s}$ (ур. 57), тогда как число периодов тока, созданного инверсным потоком, равно:

$$f_3 = f_1 \cdot \frac{n_s + n_2}{n_s} \dots \dots \dots (76)$$

Благодаря возникновению двух чисел периодов в роторе однофазная асинхронная машина оказывается непригодной ни в качестве преобразователя числа периодов, ни для регулировки числа оборотов при помощи вспомогательных машин.

Ток намагничивания в однофазной асинхронной машине вдвое больше, чем в многофазной асинхронной машине.

Электрические железные дороги с однофазным током предпочли, прежде всего из-за неблагоприятного пуска, однофазным асинхронным машинам последовательно соединенные коллекторные машины, несмотря на тяжелые условия коммутации последних. В какой мере новейшее решение вопроса, предложенное фирмой Крупп, даст положительные результаты, покажет будущее ¹⁾.

§ 15. Пояснение к снимкам и выбор размеров.

На предыдущих страницах были даны изображения ряда машин. На фиг. 273 представлен тихоходный трехфазный двигатель на 124 оборота в минуту, 3000 kW при первичном напряжении в 6000 вольт. Статор и ротор этой большой машины состоят из двух частей. Подшипники, установленные на фундаменте отдельно от статора, охлаждаются циркулирующей водой. На каждое контактное кольцо наложено несколько щеток. На фигурах 274, 276 и 298 даны снимки асинхронной машины реактивной мощности на 10000 kVA, а на фиг. 275 показан снимок ротора машины в 5000 kVA. Число оборотов машины в 10000 kVA равно 1000 при напряжении сети в 10000 вольт. В статоре машины на фиг. 276 предусмотрены сильные крепления обмоток. Фиг. 298 изображает машину в испытательном помещении в собранном виде вместе с трехфазной возбуждательной машиной постороннего возбуждения. На фиг. 287 показан двигатель с ротором, работающим по принципу вихревых токов; этот двигатель на 13 kW и 1440 об./мин. представлен в разобранном виде, что дает возможность убедиться в простоте устройства коротко-замкнутого ротора. Стержни ротора, припаянные к замыкающим кольцам, для лучшего охлаждения частично выступают за кольца.

В следующей сводке приводятся мощности и числа оборотов остальных машин:

Фиг. 293 — двигатель Гейланда 4 kW, около 1430 об./мин.

Фиг. 294 — двигатель Осноса 15 kW, около 1480 об./мин.

Фиг. 296 — асинхронная машина с возбуждательной трехфазной машиной собственного возбуждения, 40 kW и около 720 об./мин.

Фиг. 297 — трехфазная возбуждательная машина собственного возбуждения (5 kVA) с присоединенным приводным двигателем.

Фиг. 299 — трехфазная возбуждательная машина, 26 kVA, 1490 об./мин.

Фиг. 301 — синхронизированный трехфазный двигатель, 40 kW, 750 об./мин., $\cos \varphi_1 = 0,8$ (опережает).

¹⁾ P u n g a und L. S c h ö n. Der neue Kollektoriöse Einphasenmotor der Firma Krupp. ETZ. 1926.

Мерой для величины машины является предельная температура, допускаемая по нормам (REM 23) в обмотках и в железе и возникающая под действием джоулевых потерь и потерь в железе. Эта предельная температура составляет для обмотки статора 85° при нормальных обмотках и 95° при обмотках, пропитанных асфальтовой массой, следовательно, при обмотках высокого напряжения. Так как максимальная допустимая температура окружающей среды не должна быть больше 35°, то превышение температуры в зависимости от обмотки будет составлять 50° или 60°. Если температура окружающей среды больше, чем 35° (в котельных помещениях, в тропических странах и т. п.), то без вреда для изоляции машина сможет отдавать лишь мощность, пониженную в отношении превышений температур (при предельной температуре в 85° и температуре окружающей среды 45° мы будем иметь лишь $\frac{40}{50} \cdot 100 = 80\%$ от мощности). Определение нагревания машины, а следовательно и наиболее благоприятного использования материала, является главным образом делом опыта и не может быть удовлетворительно решено путем подсчета.

Общее уравнение для определения размеров:

$$kVA = \frac{N_2}{\eta \cdot \cos \varphi_1} = C \cdot D^2 \cdot l_{Fe} \cdot n_s \dots \dots \dots (77)$$

содержит постоянную C , зависящую от мощности машины, способа охлаждения и числа оборотов. Здесь D — внутренний диаметр статора и l_{Fe} — ширина чистого железа. В то время как для очень малых машин и при плохой вентиляции величина C часто должна быть выбрана ниже $1 \cdot 10^6$, для мощных машин и при благоприятных условиях вентиляции эта постоянная использования возрастает до $3,5 \cdot 10^6$ и больше. Типовые ряды намечаются по диаметру и длине. Вообще говоря, стремятся к тому, чтобы машины получились возможно более длинными, так как длинная машина всегда дешевле машины с большим диаметром. Коэффициент $\frac{l_{Fe}}{D}$ в сторону увеличения все же ограничен с одной стороны вентиляцией, ухудшающейся по мере увеличения длины, а с другой стороны — прогибом вала.

Мерой для способности к перегрузке, а тем самым и для главных свойств машины, является выбор индукции в воздухе. Величина последней колеблется обычно между 6 000 и 8 000 гауссов. В машинах для кратковременной работы, следовательно, для крановых, подъемных двигателей и т. п. индукцию в воздухе, в особенности, учитывая необходимую в большинстве случаев высокую способность к перегрузке, следует выбирать больше, чем 10 000 гауссов. Коэффициент мощности машины с большой способностью к перегрузке, однако, всегда менее благоприятен, чем в нормальной машине. Индукцию в зубцах принимают в среднем между 15 000 и 17 000, а индукцию в ярме — между 8 000 и 12 000 гауссов.

При данном напряжении, а следовательно, и магнитном потоке, выбор индукции связан с определенным числом витков в статоре. В роторе, однако, число витков произвольно и может быть выбрано наиболее благоприятным для пускового сопротивления. Для мощных машин междуфазовое напряжение между двумя контактными кольцами в неподвижном состоянии, учитывая размеры пускового сопротивления, не должно, вообще говоря, быть больше 1 500 вольт.

Плотности тока в медных проводах принимаются для малых и быстроходных машин 4,5 амп./мм², а для больших и тихоходных машин — 3 амп./мм². Для ослабления явления вытеснения тока в массивных проводах большого

сечения, последние подразделяются на несколько проводов меньшего сечения. Подобные провода называются „медными тросами“.

В нижеприведенных таблицах сопоставляются данные из каталогов для некоторых машин.

1. Трехфазные асинхронные двигатели различных мощностей при одном и том же синхронном числе оборотов в 1000 обор./мин.

Отдача мощности kW	Число оборотов в минуту около	$\cos \varphi$	η
1,1	935	0,77	0,79
11	955	0,84	0,86
100	975	0,89	0,91
550	985	0,9	0,935
1 025	990	0,91	0,95
2 000	992	0,91	0,955

2. Двигатели с одинаковым внутренним диаметром статора и одинаковой длиной железа при различных числах пар полюсов.

p	Отдача мощности kW	Число оборотов в минуту	$\cos \varphi$	η
2	170	1 470	0,91	0,92
3	100	975	0,89	0,91
4	80	730	0,88	0,905
5	50	585	0,85	0,89
6	40	485	0,82	0,88

3. Двигатели с одинаковым внутренним диаметром статора и одинаковой длиной железа при низком числе оборотов.

p	Отдача мощности kW	Число оборотов в минуту	$\cos \varphi$	η
5	530	590	0,9	0,945
6	400	491	0,9	0,935
8	275	367	0,88	0,93
10	180	293	0,86	0,921
12	125	244	0,81	0,895

Из сопоставления видно, что двигатель с большим числом оборотов (1500 и 1000 об./мин.) является всегда наиболее выгодным.

ЧАСТЬ III.

КОЛЛЕКТОРНЫЕ МАШИНЫ.

Статья дипл. инж. Герхарда Рееринка (Gerhard Reerink), Берлин (Siemens-Schuckertwerke).

А. Коллекторные машины трехфазного тока.

§ 1. Применение и устройство.

На долю коллекторных машин трехфазного тока (с другим числом фаз мы обычно не встречаемся) приходится особые области применения. Они применяются лишь как двигатели и не играют в настоящее время никакой роли в качестве генераторов, за исключением разве того случая, когда генераторное действие этих машин используется для целей торможения.

Из-за своего устройства, а также благодаря не очень благоприятному использованию материала, вызываемому плохим использованием коллекторных щеток ¹⁾, коллекторные машины трехфазного тока оказываются дороже двигателей постоянного тока и трехфазных асинхронных двигателей, а потому применяются лишь там, где их особые преимущества окупают стоимость их изготовления.

Шунтовой двигатель трехфазного тока имеет такую же шунтовую характеристику, как и шунтовый двигатель постоянного тока и асинхронный двигатель, и применяется в тех случаях, когда при трехфазном токе желательно иметь плавную и без потерь регулировку числа оборотов и в то же время сохранить шунтовую характеристику, как, например, в случае работы машин на бумажном производстве и некоторых машин для изготовления инструментов. Как известно, у трехфазного двигателя с регулировкой числа оборотов при помощи сопротивлений в цепи якоря колебание нагрузки при числе оборотов, сильно отличном от синхронизма, вызывает также и сильное колебание числа оборотов (фиг. 284, кривые *b* и *c*). Здесь же колебание числа оборотов происходит в очень узких пределах (фиг. 308), так как шунтовая характеристика сдвигается параллельно, выходя из точек холостого хода.

У трехфазного серийного двигателя, так же как и у серийного двигателя постоянного тока, мы имеем малые числа оборотов при большой нагрузке и большие числа оборотов при слабых нагрузках. Для подъемников и транспорта — этих главных областей применения серийных двигателей — трехфазный серийный двигатель часто неприменим, так как его числа оборотов лучше всего менять путем смещения щеток от руки, тогда как для подобных приводов бывает желательно управление на расстоянии

¹⁾ M. Schenkel. ETZ 1912, S. 475.

при помощи контроллерных валов. Главной областью применения трехфазного серийного двигателя является приведение в движение прядильных машин.

Преимущества, оправдывающие применение трехфазных коллекторных машин, следующие: тонкая и без потерь регулировка числа оборотов, большой пусковой момент, благоприятный коэффициент мощности (при полной нагрузке близкий к единице (возможна даже избыточная компенсация), и очень часто, при пуске посредством перемещения щеток, отсутствие необходимости в пусковых сопротивлениях.

Кроме того, трехфазные коллекторные машины применяются еще и в качестве чистых преобразователей и, в особенности, в качестве преобразователей частоты. Трехфазные возбуждающие машины для компенсации асинхронных машин (о чем было сказано выше при описании асинхронных машин) следует рассматривать как преобразователи частоты.

Из многочисленных возможных способов соединений вытекают и различные устройства. На статоре из пакетов железных листов с пазами большей частью имеется трехфазная обмотка, питаемая от сети или непосредственно, или через трансформатор. Эта обмотка бывает так же, как и в трехфазном шунтовом двигателе с питанием якоря, связана с якорем при помощи щеток. В пазах якоря почти всегда имеется замкнутая на себя петлевая диаметрально обмотка, как в машинах постоянного тока. Кроме того, в трехфазном шунтовом двигателе в тех же пазах имеется еще и трехфазная обмотка, связанная через контактные кольца с сетью. По коллектору скользят по три щетки на каждое двойное полюсное деление, находящиеся друг от друга на расстоянии 120 электрических градусов. На щеточных болтах в щеткодержателях укрепляются две или несколько щеток. Щетки, находящиеся на одном болту, электрически связаны между собою. Болты служат одновременно и для подведения тока. Щетки, щеткодержатель, болты и траверсы для передвижения щеток носят общее название щеточного устройства, приводимого в движение при помощи червяка и ручного маховичка. У коллекторных машин с двойным комплектом щеток оба эти комплекта могут смещаться друг относительно друга на том же коллекторе. Коллектор устроен в принципе так же, как и у машин постоянного тока.

Коллектор должен находиться под небольшим напряжением. Поэтому при больших напряжениях требуются трансформаторы. Предвключенным трансформатором называется трансформатор, включенный между сетью и первичной обмоткой, тогда как трансформатор, включенный между первичной и вторичной обмоткой, называется промежуточным трансформатором.

Коллекторные машины, так же как и все остальные машины, выполняются открытыми, с вентилируемым кожухом или совершенно закрытыми в зависимости от назначения и места установки.

§ 2. Якорь при питании трехфазным током.

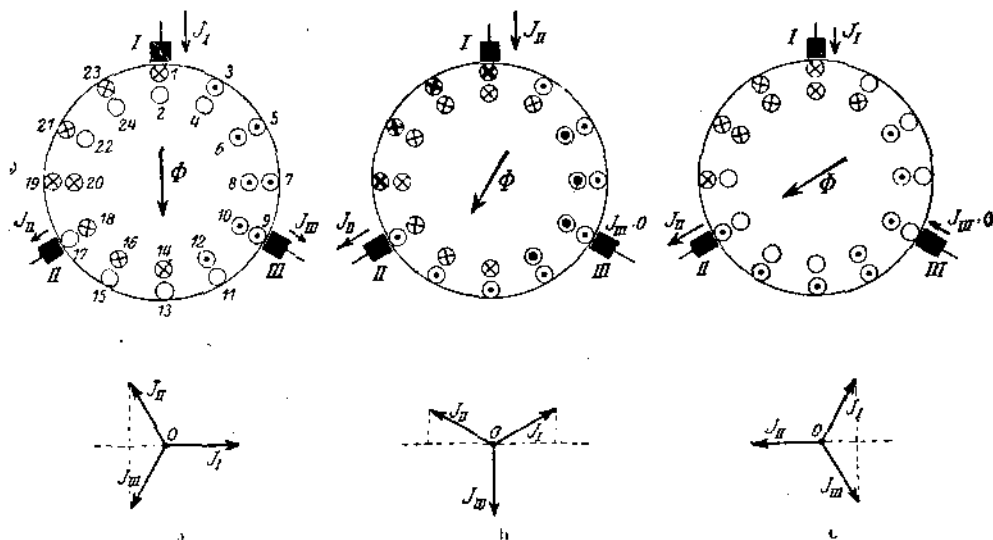
Трехфазные коллекторные машины работают под действием трехфазного потока. Якорь трехфазного коллекторного двигателя может быть присоединен к сети через коллекторные щетки или через контактные кольца.

Если коллекторные щетки присоединены к сети с числом периодов f_1 , то при питании якоря синусоидальными напряжениями трехфазный поток будет вращаться относительно щеток и пространства с числом оборотов, получаемым из ур. (46):

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{2p} \text{ об./мин.}$$

Эта скорость в пространстве остается постоянной, независимо от того, остается ли якорь в покое или вращается. Если к статору с равным числом полюсов и к трехфазной обмотке приложено напряжение одного и того же числа периодов, то возникший здесь трехфазный поток вращается в пространстве всегда с той же скоростью, что и трехфазный поток якоря.

На фиг. 303а, б и в представлено распределение тока при неподвижном двухполюсном якоре. Коллектор и соединения проводников петлевой обмотки с диаметральной шагом, а также и соединения верхнего и нижнего слоев между собою, здесь не представлены. Предположим, что щетки скользят по голым проводам верхнего слоя якоря со стороны, обращенной к наблюдателю. Соединение проводников между собою пусть будет 1—14—3—16—5—18 и так далее до 21—10—23—12 и назад к проводу 1.



Фиг. 303. Питание обмотки постоянного тока при помощи переменного тока.

Под якром начерчена диаграмма фазовых токов. На фиг. 303а к щетке I будет притекать сила тока с максимальным значением, в тот момент, когда от щеток II и III будет уходить сила тока, равная половине максимального значения. Проводники между щетками II и III будут лишены тока. На фиг. 303с, при аналогичном распределении тока, после $\frac{1}{6}$ периода будут лишены тока провода между щетками I и III. В промежуточный момент времени (рис. 303б) через провода, расположенные между щетками I и II, будет проходить двойной ток в сравнении с остальными проводами. Применяя правило штопора (или правило пловца, данное Ампером), мы увидим, что линия симметрии трехфазного потока, или „магнитная ось“, всегда проходит через тот проводник, через который проходит в данный момент максимальный ток. При сдвиге щеток сдвигается всегда также и магнитная ось якоря.

При питании якоря через коллекторные щетки током с числом периодов статора число оборотов трехфазного потока в пространстве остается для различных моментов эксплуатации одним и тем же. С изменением же числа оборотов меняются и индуктированные в обмотке якоря ЭДС. Лишь при неподвижном двигателе число периодов ЭДС якоря равно числу периодов у щеток. При вращении якоря в направлении, одинаковом с трехфазным

потоком, число периодов тока в якоре уменьшается и становится равным нулю, когда якорь вращается синхронно с трехфазным потоком якоря. В случае сверхсинхронного вращения якоря направление ЭДС якоря меняется.

При втором способе соединения обмотка якоря питается через контактные кольца непосредственно или через посредствующие звенья. В этом случае трехфазный поток якоря сохраняет постоянную скорость вращения относительно проводников якоря, так что при всех числах оборотов во второй обмотке якоря всегда будет индуцироваться неизменная ЭДС. При различных числах оборотов якоря меняются, однако, скорость трехфазного потока в пространстве и число периодов у коллекторных щеток. Если якорь вращается против направления вращения трехфазного потока, но с той же скоростью, что и последний, то поток в пространстве будет неподвижен и между коллекторными пластинами окажется постоянное напряжение. При других числах оборотов у коллекторных щеток мы будем иметь напряжение с числом периодов скольжения f_2 из ур. (57):

$$f_2 = \frac{n_s - n_2}{n_s} f_1 \text{ пер./сек.}$$

Для того, чтобы скорости вращения трехфазных потоков якоря и статора в пространстве всегда соответствовали друг другу, необходимо, чтобы при питании якоря через контактные кольца статор был приключен к сети не непосредственно, а лишь через коллекторные щетки. Такое соединение имеет трехфазная шунтовая машина с питанием якоря.

В обоих случаях питания якоря коллектор вызывает изменение числа периодов с первичного на вторичное число периодов, так что у коллекторных машин мощность может передаваться между первичной и вторичной частью не только трансформаторным путем, но и путем непосредственного соединения.

I. Трехфазный шунтовый двигатель.

§ 3. Соединение и принцип действия.

Оба способа, применяемые для соединения трехфазного шунтового двигателя ¹⁾, представлены на фиг. 304а и б. На фиг. 305 изображен якорь, а на фиг. 306 — трехфазный шунтовой двигатель в собранном виде на 2,2 kW, 380 вольт, 50 периодов, с пределом регулировки на 750—1500—2250 об./мин. и с питанием якоря.

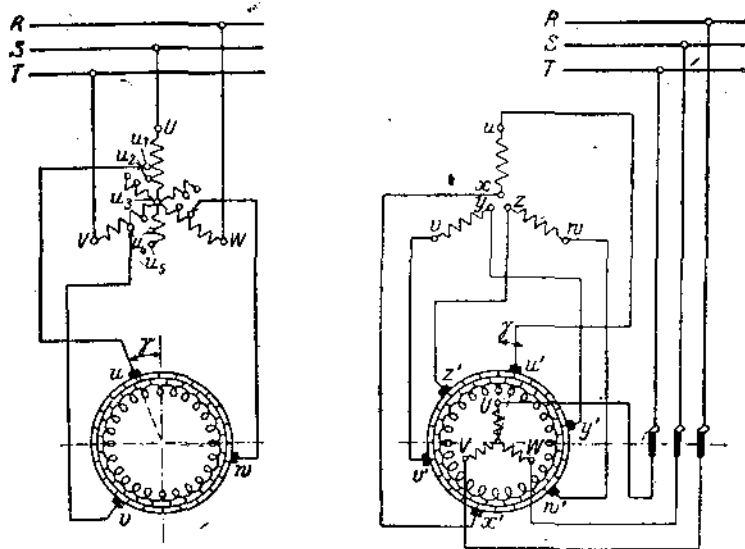
Способ действия при питании статора и при питании якоря один и тот же. Уже при холостом ходе можно достигнуть число оборотов, отличное от синхронного, для чего через коллектор к вторичной части подается напряжение, имеющее желательное число периодов и направленное, при числе оборотов ниже синхронного, противоположно индуцированной ЭДС, а при числе оборотов выше синхронного — в ту же сторону, что и эта ЭДС.

При питании статора, или у двигателя системы Винтер-Эйхберга (Winter-Eichberg), изображенного на рис. 304а, трехфазная обмотка статора присоединена к сети и создает неизменный по величине трехфазный поток. Обмотка статора имеет ответвления в каждой фазе, так что к якору могут быть подведены напряжения различной величины. Точки ответвления под-

¹⁾ Arnold-la-Cour. Die Wechselstromtechnik, B. V, Verlag Springer 1923.—F. Eichberg ETZ, 1910 S. 749, 785, 794. — H. K. Schrage, ETZ, 1914 S. 89. — F. Hillebrand. ETZ, 1913 S. 1210. Arch. f. Elektr., 1912.

водятся к переключающему валу, приобретающему большие размеры, что является недостатком машины), так как коллектор может быть выполнен для максимальных напряжений около 80 вольт.

Вместо того, чтобы снимать напряжение, потребное для регулировки, с ответвлений обмотки статора, можно таким же образом использовать и трансформатор с ответвлениями и с обмоткой, продолженной за нулевую точку. Мерилом для предела регулировки числа оборотов является передаточное число K . Число K представляет собою отношение числа витков статорной обмотки между точкой ответвления и нулевой точкой к числу витков обмотки якоря. Если щетки установлены на ответвлениях u_1 , v_1 и w_1 , то число K будет положительным и двигатель вращается с числом оборотов ниже синхронного. При ответвлении в нулевой точке или при корот-



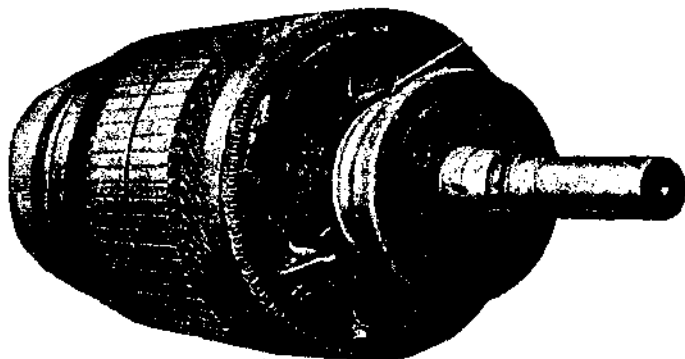
Фиг. 304. Схема трехфазного шунтового двигателя: а) с питанием статора и б) с питанием ротора.

ком замыкании щеток, следовательно при $K=0$, двигатель работает как обыкновенный асинхронный двигатель, тогда как в положениях u_4 , v_4 , w_4 и u_5 , v_5 , w_5 при отрицательном K число оборотов выше синхронного. Двигатель Гейланда (Heyland) является шунтовым двигателем с питанием статора и без регулировки числа оборотов.

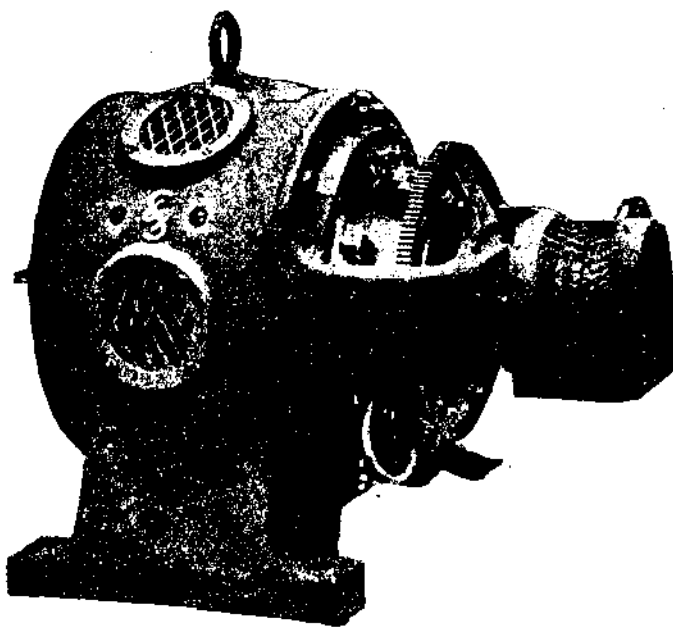
Двигатели с питанием якоря или двигатели Шраге (Schrage) (см. фиг. 304б) имеют то преимущество, что, в отличие от двигателей с питанием статора, число оборотов всегда может быть регулируемо при помощи сдвига щеток. Магнитный поток, вращающийся с равномерной угловой скоростью и пересекающий обмотку якоря, индуцирует ЭДС в обмотке, соединенной с коллектором. Каждая пара щеток, связанных с открытыми концами фаз статора, дает напряжение якоря различной величины. Таким образом, коллектор должен иметь в общей сложности по 6 щеток на каждое двойное полюсное деление и один двойной набор щеток. Для величины предела регулировки мерилom является и в данном случае передаточное отношение числа витков K . Здесь передаточное число будет наибольшим при максимальном расстоянии между двумя щетками, принадлежащими одинаковым фазам статора (следовательно, при сдвиге их на 180°), а, тем самым, и при максимальном числе витков обмотки якоря, находящейся между обеими

щетками. При этом число оборотов отклоняется больше всего от синхронного. При числах оборотов, более близких к синхронному, щетки должны быть сближены друг с другом.

Если две щетки соответствующие друг другу, расположены на одной и той же коллекторной пластине, то обмотка статора оказывается коротко-



Фиг. 305. Ротор трехфазного шунтового двигателя с питанием со стороны ротора.



Фиг. 306. Трехфазный шунтовый двигатель с питанием ротора.

замкнутой и трехфазный шунтовой двигатель снова превращается в обыкновенный асинхронный. Щеточные устройства должны иметь возможность передвигаться друг относительно друга независимо. У этого двигателя каждому положению щеток соответствует определенная шунтовая характеристика. Двигатель Осноса (Osnos), упомянутый в параграфе о компенсированных асинхронных двигателях, соединен как трехфазный шунтовой двигатель с питанием якоря.

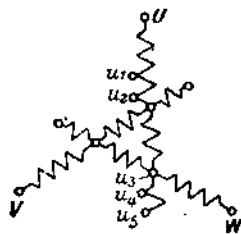
При числе оборотов ниже синхронного во вторичную часть передается трансформированная мощность, пропорциональная скольжению, как в случае асинхронной машины, тогда как другая часть энергии превращается в механическую энергию. После преобразования числа периодов мощность скольжения возвращается через коллектор в первичную обмотку. При числе оборотов выше синхронного щетки электрически подводят ко вторичной части еще некоторую мощность, превращаемую в механическую мощность наравне с мощностью, полученной от трансформации.

Таким образом, с увеличением предела регулировки должны увеличиться как коллектор, так и число щеток. Для того, чтобы коллектор не оказался слишком большим, берут в качестве нижнего предела для чисел оборотов половину синхронного числа оборотов, а для верхнего предела — 1,5-кратную величину синхронного числа оборотов. Отношение K числа витков должно колебаться между $K = +0,5$ и $K = -0,5$, так как при этом к коллекторным щеткам приложена максимально половина вторичного напряжения при неподвижном состоянии и соответственно этому достигается половина или 1,5-кратная величина числа оборотов. Изменения предела регулировки в сторону уменьшения можно достигнуть также при помощи сопротивлений между коллектором и статором, при чем, однако, неизбежны потери и невозможно сохранение шунтовой характеристики. Эти сопротивления используются в то же время и как пусковые сопротивления. Если передаточное число K было бы взято равным единице, то эти сопротивления оказались бы излишними и, при правильно выбранных размерах коллектора, представилось бы возможным регулировать число оборотов до нуля и пускать в ход исключительно при помощи сдвига щеток.

§ 4. Сдвиг фаз. Рабочие кривые.

Коэффициент полезного действия мощности трехфазного шунтового двигателя может быть улучшен простым способом. Если коллекторные щетки, а тем самым и магнитную ось якоря у двигателя с питанием статора, сдвинуть на угол γ от направления оси обмотки статора, то коэффициент мощности при этом улучшится, так как часть намагничивания доставляется от вторичной обмотки. Компенсация при помощи такого сдвига щеток всегда влечет за собой небольшое изменение числа оборотов ¹⁾.

Для изменения коэффициента мощности у двигателя с питанием якоря следует сдвинуть щетки каждой фазы статора на общий угол γ , тогда как расстояние между щетками должно оставаться неизменным. Для того, чтобы, при всех числах оборотов достигнуть благоприятного коэффициента мощности, комплекты щеток должны передвигаться друг относительно друга с различной скоростью. При выполнении выбирают разность скоростей движения комплектов щеток приблизительно в 10%. При этом мы получаем для различных моментов вращения коэффициент мощности согласно фиг. 309. При несинхронном числе оборотов мы имеем тот же коэффициент мощности, что и при соответствующем асинхронном двигателе. Благоприятному опережающему сдвигу фаз тока при числе оборотов выше



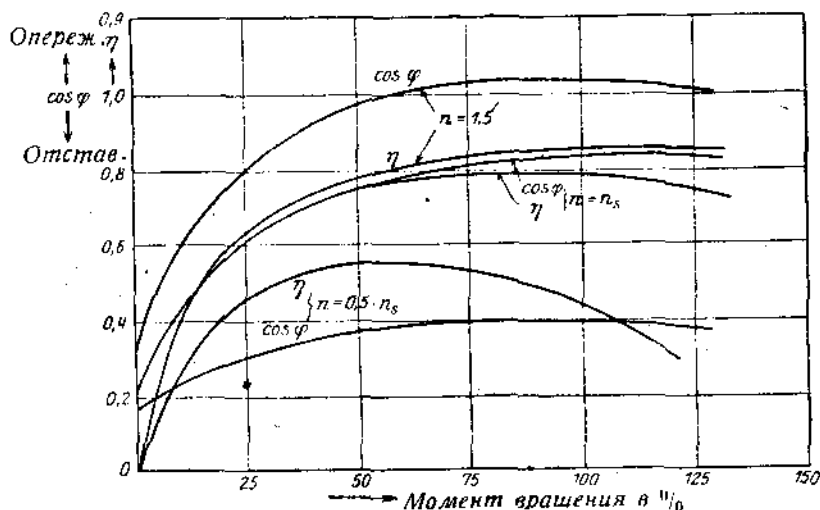
Фиг. 307. Соединение обмотки статора трехфазного шунтового двигателя для улучшения коэффициента мощности.

¹⁾ Dr Schenk el. Die Kommutatormaschinen für einphasigen und mehrphasigen Wechselstrom, Verlag Walter de Gruyter u Co., 1924.

синхронного содействует то обстоятельство, что относительно статора вторичное рассеяние становится отрицательным. Для улучшения коэффициента мощности двигателя с питанием статора фирма АЕГ выполняет соединение обмотки статора комбинированным из звезды и треугольника (рис. 307)



Фиг. 308. Регулировка числа оборотов трехфазного шунтового двигателя.



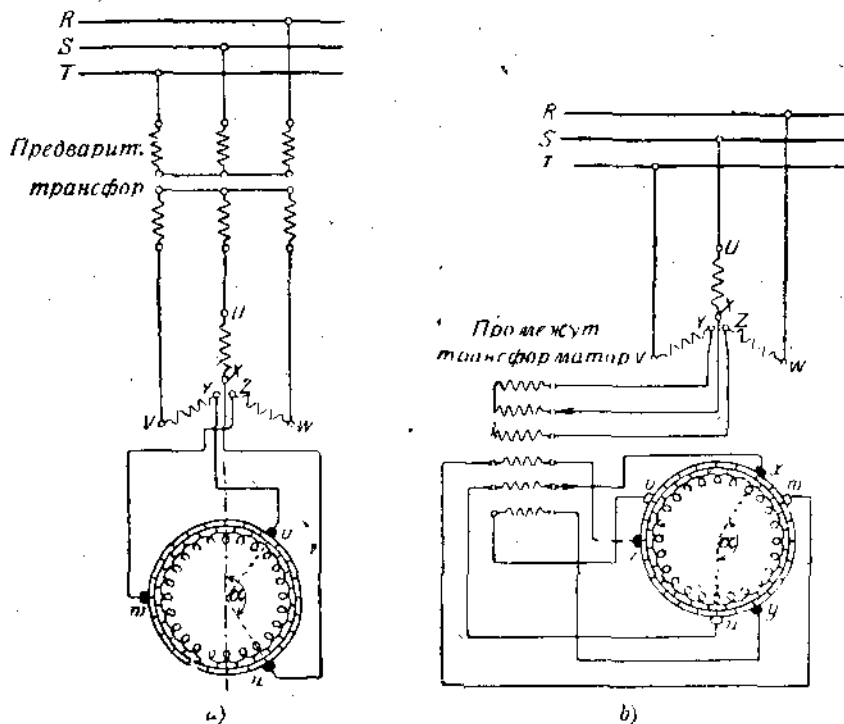
Фиг. 309. Коэффициент полезного действия η и коэффициент мощности $\cos \varphi$ при различных числах оборотов в зависимости от момента вращения.

Из фиг. 308 ясно, что между числом оборотов 0,5 и 1,5-кратным синхронному имеется шунтовая характеристика. При числе оборотов ниже половины синхронной характеристики при регулировке сопротивлениями между статором и ротором сильно падают. Кривые на фиг. 308 и 309 сняты с трехфазного шунтового мотора в 20 kW, имеющего синхронное число оборотов, равное 1 000 об./мин.

II. Трехфазный серийный двигатель.

§ 5. Соединение и принцип действия.

Как это видно на фиг. 310а и б при трехфазном серийном двигателе ¹⁾ статор и ротор соединяются между собою последовательно, так что в статоре с нормальной трехфазной обмоткой и у коллекторных щеток всегда будет одинаковое число периодов. При напряжении, большем чем 550, требуется предвключенный трансформатор. При низких напряжениях коллекторные щетки питаются через промежуточный трансформатор, имеющий при одинаковых мощностях и одинаковых пределах регулировки меньшие



Фиг. 310. Трехфазный серийный двигатель: а) с предвключенным трансформатором и одинарным комплектом щеток и б) с промежуточным трансформатором и двойным комплектом щеток.

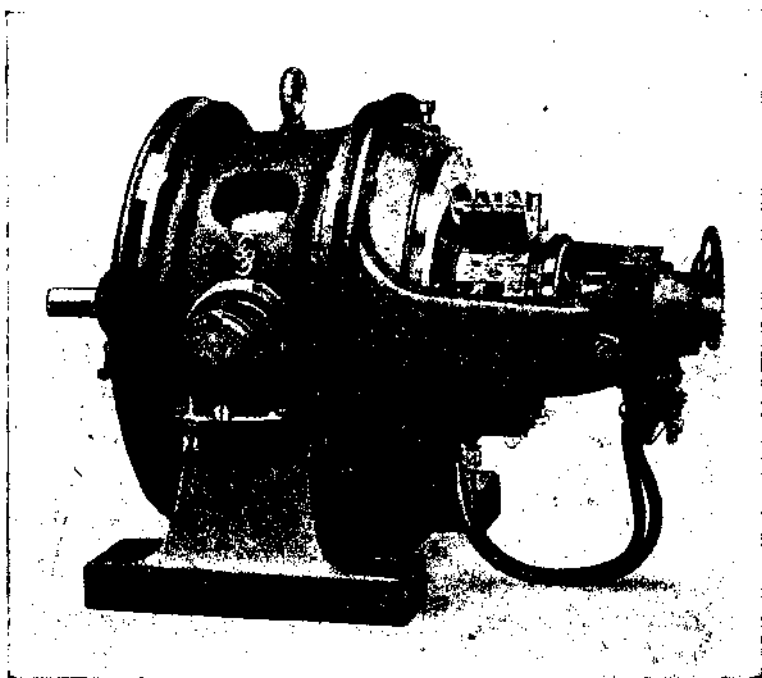
размеры, чем предвключенный трансформатор. Трехфазный серийный двигатель, представленный на фиг. 310б, имеет двойной комплект щеток. И здесь может быть установлен предвключенный трансформатор, или, как это имеет место на рисунке, — промежуточный трансформатор. Пуск в ход и регулировка числа оборотов осуществляются при помощи перемещения щеток. На фиг. 311 представлен трехфазный серийный двигатель в 12 kW при 50 периодах и пределе регулировки в 750/1500/1850 об./минуту.

В нулевом положении коллекторные щетки находятся на оси статорной обмотки. Трехфазные потоки, возникающие как в статоре, так и в роторе, вращаются при этом с синхронным числом оборотов и оба трехфазных

¹⁾ R. Rüdenberg, ETZ, 1910. S. 1181, 1221 и 1911 S. 233, 391, 489; — M. Schenkel, ETZ, 1912 S. 473; — Jonas, ETZ, 1913 S. 1081; — Moser, Elektr. u. Masch.-Bau, 1915.

ных потока намагничивают в одном и том же направлении. Двигатель не развивает никакого момента вращения и расходует лишь незначительный ток для намагничивания. При смещении коллекторных щеток на 180 электрических градусов против нулевого положения вращающие потоки статора и ротора действуют друг другу навстречу. В таком положении короткого замыкания двигатель расходует максимальную силу тока. Момент вращения не может развиваться также и при этом положении щеток.

Результирующий магнитный поток создается совместно статором и ротором не только в нулевом и коротко-замкнутом, но также и в промежуточных положениях. Нормальный сдвиг щетками оси якоря по отношению



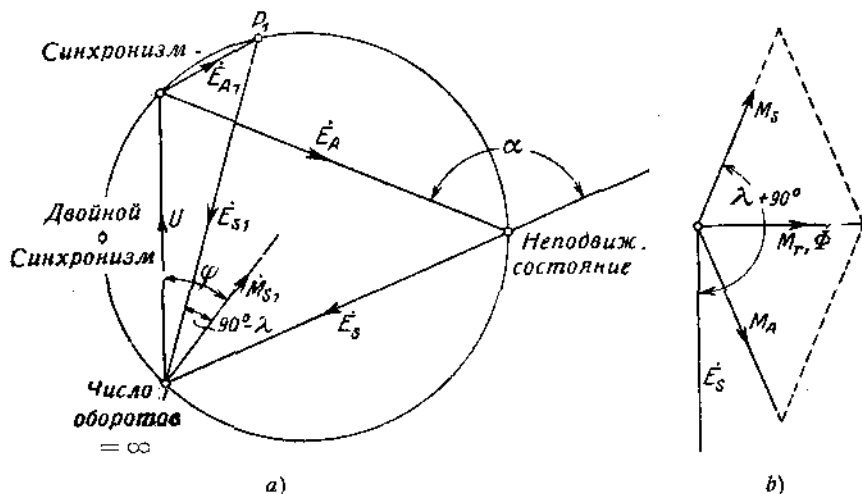
Фиг. 311. Трехфазный серийный двигатель в 12 kW.

к средней оси статорной обмотки составляет $\alpha=150$ электрическим градусам. В этом положении ось результирующего потока Φ расположена почти перпендикулярно к оси щеток, как это и требуется для образования момента вращения.

Из-за наличия сдвига осей обмоток в пространстве трехфазные потоки индуктируют в обмотках статора и ротора ЭДС, сдвинутые во времени на 150° . Напряжение сети всегда является результирующей из ЭДС E_s и E_r , индуктированных в статоре и якоре (не учитывая при этом падения напряжения). На рис. 312а представлена зависимость между напряжениями при различных числах оборотов и при пренебрежении падением напряжения. В неподвижном состоянии ЭДС E_s и E_r равны между собой. В этом случае ЭДС образуют стороны, а напряжение у зажимов — основание равнобедренного треугольника. При всех рабочих состояниях при числах оборотов ниже синхронного, а также при числах оборотов против направления вращения трехфазного потока, угол между ЭДС должен оставаться постоянным. Поэтому вершина треугольника всегда будет передвигаться

по окружности с радиусом $R = \frac{u}{2 \sin \alpha}$ и с хордой, равной напряжению сети ¹⁾. Величина E_A изменяется пропорционально числу оборотов. Поэтому при синхронизме $E_A = 0$, а при числе оборотов выше синхронного она меняет свое направление, так что угол между E_s и E_A становится тупым. При двойном синхронизме величина E_s будет снова равна E_A , как в случае неподвижного состояния.

Из этой диаграммы можно также определить и сдвиг фаз при различных числах оборотов, при условии, если при этом не учитывать джоулевы потери в обмотках и индуктивные падения от рассеяния. На рис. 312 б представлены магнитодвижущие силы статора M_s и ротора M_A и простран-



Фиг. 312. а) Диаграмма времени; б) пространственная диаграмма трехфазного серийного двигателя.

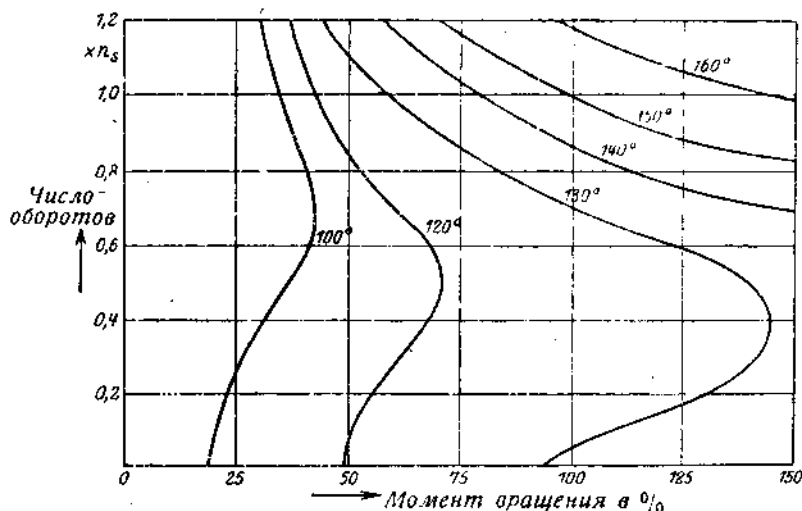
ственный сдвиг между ними. Эта диаграмма является чисто пространственной диаграммой, так как фазы обеих магнитодвижущих сил равны между собой. Магнитный поток совпадает по направлению с результирующей M_r . По отношению к этому потоку ЭДС E_s обмотки статора отстает во времени на 90° . Таким образом, если обозначить буквой λ пространственный угол, заключенный между ЭДС статора и магнитным потоком, то угол между M_s и E_s останется неизменным и равным $90^\circ + \lambda$. На рис. 312а представлена для точки P_1 величина M_s , сдвинутая относительно E_s на упомянутый угол. Отсюда следует, что уже при синхронизме $\cos \varphi$ получается благоприятным, а при числах оборотов выше синхронного $\cos \varphi$ близок к единице. Коэффициент мощности может быть улучшен увеличением магнитодвижущей силы якоря на 10 — 15% в сравнении с МДС статора, так как в этом случае якорь дает большее намагничивание. При этом двигатель при синхронизме имеет коэффициент мощности, равный приблизительно 0,97.

§ 6. Рабочие кривые.

Пуск в ход двигателя осуществляется при помощи сдвига щеток с нулевого положения. Если двигатель должен вращаться в одном направлении с трехфазным потоком, то щетки должны быть смещены с нулевого положения против направления вращения трехфазного потока. С возрастанием

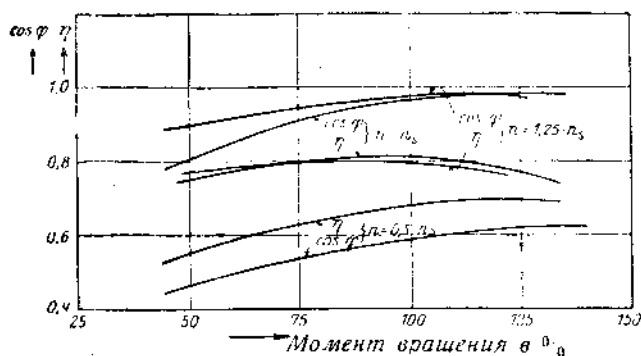
¹⁾ М. Liwischitz. Die elektrischen Maschinen. B. G. Teubner. 1926.

сдвига щеток возрастает и пусковой момент. При сдвиге щеток по направлению вращения трехфазного потока, якорь вращается против направления вращения трехфазного потока. При этом двигатель перегревается, так как его коэффициент мощности ухудшается, а в железе якоря возникают



Фиг. 313. Зависимость между числом оборотов, моментом вращения и углом сдвига щеток α в трехфазном серийном двигателе с предварительным трансформатором и простым комплектом щеток.

большие потери из-за увеличения числа периодов. О правильном направлении вращения можно судить по уменьшению напряжения между коллекторными щетками. Направление вращения якоря можно определить из пространственной диаграммы (фиг. 312 б) и по направлению потока и силы тока при помощи правила левой руки (§ 1, ст. Штэссингера). Для изменения направления вращения следует поменять местами как оба зажима обмотки статора, так и коллекторные щетки.



Фиг. 314. Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности трехфазного серийного двигателя при различных числах оборотов в зависимости от момента вращения.

размеров, а потому его приходится защитить от большого числа оборотов при помощи центробежного выключателя. Нормальный предел регулировки числа оборотов колеблется между 0,5–1,5-кратным от синхронного. Из фиг. 313 следует, что с увеличением угла сдвига щеток возрастает число оборотов, так как результирующий магнитный поток ослабляется и при одинаковом напряжении у зажимов величина ЭДС

На фиг. 313 и 314 представлены эксплуатационные кривые трехфазного серийного двигателя. Число оборотов сильно изменяется с изменением нагрузки. При холостом ходе число оборотов двигателя может возрасти до опасных

может остаться приблизительно той же лишь при увеличении числа оборотов. Как и у всех серийных машин величина магнитного потока зависит от силы тока, создающего момент вращения совместно с магнитным потоком. При небольших насыщениях железа момент вращения пропорционален поэтому квадрату силы тока в якоре. Из кривых рис. 313 следует, что при небольших сдвигах щеток характеристики чисел оборотов имеют перегиб; это значит, что после некоторого определенного момента двигателя останавливается. Устройство двойного набора щеток придает трехфазному двигателю устойчивость в работе и при меньших углах α . В положении пуска подвижные щетки x, y, z (фиг. 310 б) установлены на тех же коллекторных пластинах, что и неподвижные щетки u, v, w . В нормальном рабочем положении сдвиг щеток, принадлежащих одинаковым фазам статора, равен около 120° . Лишь при очень малом угле α между щетками число оборотов становится неустойчивым. В остальном, однако, что касается коэффициента полезного действия и коэффициента мощности, двойной комплект щеток имеет лишь одни недостатки; ухудшается также и коммутация, особенно при пуске.

Промежуточный трансформатор имеет ряд крупных преимуществ в сравнении с предвключенным трансформатором. Он не должен быть рассчитан на полную мощность двигателя. Его величина зависит от величины предела регулировки. При сильном отклонении число оборотов якоря от синхронного через него должна проходить большая мощность. Отсюда вытекает способ борьбы с большим числом оборотов при падении нагрузки при помощи насыщения в железе. При сильно насыщенном промежуточном трансформаторе момент вращения трехфазного серийного двигателя не будет больше пропорционален квадрату силы тока. Промежуточный трансформатор благоприятен также и для коммутации.

На фиг. 314 нанесены коэффициенты полезного действия и коэффициенты мощности 12 kW-ного двигателя при различных числах оборотов в зависимости от момента вращения.

В. Однофазные коллекторные машины.

§ 1. Применение и устройство.

Однофазные коллекторные машины, так же как и многофазные, устраиваются с шунтовым и серийным включениями. Они применяются лишь как двигатель.

Однофазный шунтовой двигатель сохраняет в промежутке между холостым ходом и нагрузкой почти неизменное число оборотов. Последнее может быть отрегулировано без потерь при помощи добавочных обмоток с ответвлениями. Кроме этой добавочной обмотки, для машины требуется еще и переключательный вал, а при больших напряжениях и трансформатор. Таким образом, применение однофазного шунтового двигателя рекомендуется лишь в тех случаях, когда при однофазном токе нельзя обойтись без шунтового соединения с регулировкой числа оборотов, а прибегнуть к преобразованию этого тока в постоянный оказывается нежелательным.

Однофазный серийный двигатель имеет большое значение для электрических дорог дальнего следования. Благодаря серийному соединению его обмоток благоприятному для тягового дела, его число оборотов регулируется без потерь а пусковой момент получается значительным. Этот двигатель требует большого дополнительного оборудования. Предвключенный трансформатор с ответвлениями служит для подведения различных напря-

жений, для пуска и для регулировки числа оборотов. Включения почти всегда производятся при помощи электромагнитных выключателей. Кроме тягового дела, однофазный серийный двигатель применяется очень редко.

Для многих целей применяется, однако, и репульсионный двигатель, имеющий также свойство серийного двигателя. Большое преимущество этого двигателя заключается в том, что обмотка его статора может быть изготовлена для любого напряжения, так как ротор совершенно отделен от статора. Коротким замыканием обмотки якоря он превращается в асинхронный двигатель с шунтовой характеристикой. Репульсионный двигатель имеет хороший коэффициент полезного действия и коэффициент мощности, как нормальный трехфазный двигатель. Эти преимущества, а также простота включения, делают его наиболее часто применяемым однофазным двигателем, приспособленным для действия как в качестве серийного двигателя, так и в качестве шунтового без регулировки числа оборотов и имеющим большой пусковой момент. Он применяется для кранов, подъемников, компрессоров, насосов и вентиляторов. Он применяется также и для приведения в действие прядильных машин даже и в том случае, когда из-за наличия трехфазного тока пользуются трехфазными серийными двигателями, имеющими лучший коэффициент полезного действия и коэффициент мощности.

По устройству и по характеру своей работы однофазные коллекторные двигатели бывают самые разнообразные. В некоторых машинах возбуждение осуществляется при помощи обмотки в статоре, связанной с сетью. Эта обмотка представляет собою или сосредоточенную обмотку возбуждения, так что машина обладает выдающимися полюсами, или же распределенную обмотку, занимающую $\frac{2}{3}$ окружности статора, как в однофазном асинхронном двигателе. Всю рабочую железную часть машины следует изготовить из листового железа. Статор однофазного серийного двигателя имеет, кроме обмотки возбуждения, еще компенсационную обмотку и обмотку дополнительных полюсов.

Обмотка статора, находящаяся в непосредственном соединении с сетью, не во всех однофазных коллекторных машинах служит для возбуждения магнитного потока, образующего совместно с током якоря полезный момент вращения. В однофазных шунтовых двигателях, а также в репульсионных двигателях с возбуждением якоря для получения этого момента вращения используется магнитный поток якоря. В пазах якоря обычно имеется обмотка, связанная с коллектором и в большинстве случаев выполненная как петлевая обмотка. В однофазном серийном двигателе якорь соединен последовательно с обмотками статора, при репульсионном же двигателе якорь замкнут накоротко через коллекторные щетки и не имеет никакой электрической связи со статором.

В смысле внешнего оформления эти двигатели, как и все другие, выполняются открытыми с вентилируемым кожухом или закрытыми в зависимости от назначения двигателя.

§ 2. Якорь машины постоянного тока в переменном поле.

Если к якорю двухполюсной коллекторной машины с однократно или многократно-замкнутой обмоткой постоянного тока и с двумя щетками, сдвинутыми друг относительно друга на 180° , подвести ток J_a , то в проводниках каждой половины он будет проходить в одном направлении (фиг. 315 а). При соединении проводов между собою так, как это указано на фиг. 303, направление магнитного потока, созданного токами J_a , будет соответствовать направлению тока. Магнитная ось якоря при сдвиге ще-

ток сдвигается на такой же угол. Как и в трехфазных коллекторных машинах, положение магнитной оси определяется здесь положением оси щеток.

Как уже упомянуто, магнитный ток, вызывающий момент вращения, создается или обмоткой статора, или также и обмоткой ротора. При вращении якоря этот магнитный поток индуцирует две различные ЭДС.

Пусть магнитный поток Φ находится в положении, изображенном на фиг. 315 *b*. В этом случае, по мере изменения числа периодов, он меняет свою величину и направление, сохраняя, однако, при этом вертикальное положение. При изменении магнитного потока, в проводниках якоря по закону Ленца (см. § 1, А. Машина постоянного тока) будет вызвана ЭДС трансформации. Следствием этой ЭДС является ток, противодействующий изменению магнитного потока.

На рис. 315 *b* принято, что магнитный поток возрастает. Для того, чтобы иметь возможность снять с коллекторных щеток максимальное значение напряжения, щетки должны быть установлены в положении I.

Ось щеток должна, следовательно, совпадать с осью потока. Если же короткозамкнутые щетки сдвинуты относительно оси магнитного потока на 90° (положение II), то ЭДС трансформации в самом якоре взаимно уничтожаются и не дают никакого внешнего эффекта. Пусть α — угол сдвига щеток против оси возбуждения. Тогда эффективное значение ЭДС трансформации равно:

$$E_T = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot \xi \cdot \omega \cdot f \cdot \Phi \cdot \cos \alpha \cdot 10^{-8} = 2\sqrt{2} \omega \cdot f \cdot \Phi \cdot \cos \alpha \cdot 10^{-8} \text{ вольт. (78)}$$

Во второе выражение введен обмоточный коэффициент $\frac{2}{\pi}$ распределенной однофазной обмотки [формула (52)]. ЭДС трансформации отстает в фазе от магнитного потока на 90° .

Если якорь вращается в переменном поле, то, как и при машинах постоянного тока, в положении II, перпендикулярном к оси возбуждения, может быть снята ЭДС вращения E_D . Последняя, однако, в отличие от ЭДС машины постоянного тока, является переменной ЭДС (из-за переменного направления магнитного потока) и имеет число периодов переменного потока.

Величина этой ЭДС вращения пропорциональна числу оборотов якоря, а при работе двигателя она сдвинута по фазе относительно магнитного потока возбуждения на 180° . Эффективное значение ЭДС вращения в $\frac{1}{\sqrt{2}}$ раза меньше ЭДС машины постоянного тока по ур. (35) § 2. Если щетки якоря установлены по оси потока в положении I, то по отношению к ним ЭДС внутри обмотки взаимно уничтожаются. ЭДС вращения пропорциональна, следовательно, синусу угла α .

$$E_D = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot \xi \cdot \omega \cdot \frac{n \cdot p}{60} \cdot \Phi \cdot \sin \alpha \cdot 10^{-8} = 2\sqrt{2} \omega \cdot \frac{n \cdot p}{60} \cdot \Phi \cdot \sin \alpha \cdot 10^{-8} \text{ вольт (79)}$$

§ 3. Момент вращения.

Момент вращения может быть создан лишь в том случае, если коллекторные щетки сдвинуты с направления оси магнитного потока, потребного для создания этого момента вращения. Максимальный момент вращения будет достигнут тогда, когда ось магнитодвижущей силы якоря, как и в случае машин постоянного тока, станет перпендикулярна к оси обмотки возбуждения, а поток и магнитодвижущая сила якоря имеют одинаковые фазы. Как сдвиг оси щеток и потока, отличный от $\alpha=90^\circ$, так и смещение ψ этих величин во времени, должны уменьшать момент вращения. При однофазном токе среднее значение момента вращения аналогично уравнению (40) § 3:

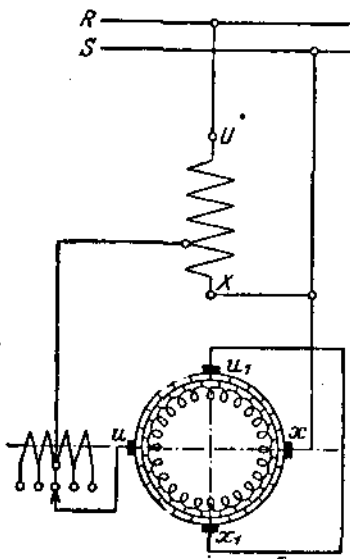
$$D = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{p}{a} \frac{z}{2\pi \cdot 9,81} \cdot J \cdot \Phi \cdot \sin \alpha \cos \psi \cdot 10^{-8} \text{ кг/м} \dots (80)$$

В самом благоприятном случае момент вращения однофазных коллекторных машин при одинаковом магнитном потоке в $\sqrt{2}$ раза меньше, чем у машины постоянного тока.

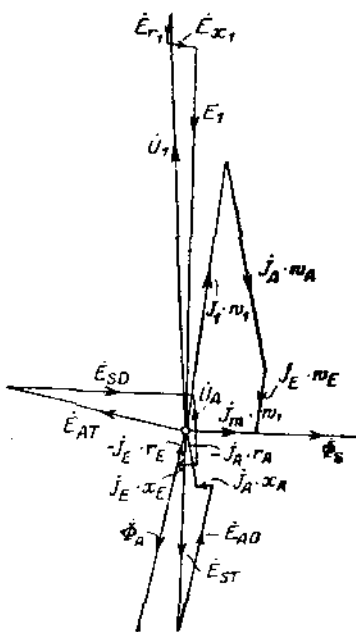
I. Однофазный шунтовой двигатель.

§ 4. Схема и векторная диаграмма.

В однофазных шунтовых двигателях (фиг. 316) обмотка статора присоединяется к полному напряжению сети U_1 , под действием которого по оси обмотки возникает магнитный поток Φ_s переменного направления, но неизменной величины.



Фиг. 316. Схема однофазного шунтового двигателя.



Фиг. 317. Частичная диаграмма однофазного шунтового двигателя.

На векторной диаграмме (фиг. 317) представлена (за вычетом падения напряжения в статоре) ЭДС E_1 , индуктированная в обмотке магнитным потоком Φ_s , опережающим эту ЭДС.

Магнитный поток Φ_s индуцирует в обмотке якоря ЭДС E_{st} , так что через коротко-замкнутые щетки a_1-x_1 будет проходить в якорь рабочая сила тока J_A . Щетки возбуждения $u-x$ присоединены параллельно к незначительной части обмотки статора. Через эти щетки проходит ток возбуждения J_E в якорь, так что по направлению щеток возбуждения возникает магнитный поток Φ_A , совпадающий по фазе с током возбуждения и создающий совместно с рабочим током потребный момент вращения. Направление вращения двигателя может быть определено по правилу левой руки. Этот магнитный поток Φ_A , так же как и поток Φ_s статора, создает ЭДС трансформации и вращения. Магнитный поток якоря опережает во времени магнитный поток статора несколько больше, чем на 90° . Таким образом, ЭДС вращения E_{Ad} , индуцированная между зажимами u_1-x_1 магнитным потоком якоря, сдвинута по отношению к E_{st} почти на 180° , так что остается лишь незначительная часть, преодолевающая омическое и индуктивное падения напряжения цепи якоря $J_A \cdot r_A$ и $J_A \cdot x_A$. Этими напряжениями исчерпываются все напряжения, действующие в рабочей цепи. Магнитный поток якоря создает между щетками $u-x$ цепи возбуждения ЭДС трансформации E_{At} , отстающую от него по фазе на 90° . По той же оси щеток, под действием потока Φ_s индуцируется также ЭДС вращения, обозначенная здесь E_{sd} . Это напряжение, однако, совпадает по фазе с Φ_s (а не сдвинуто относительно потока на 180° , как раньше); дело в том, что направление этого напряжения определяется из направления вращения по правилу правой руки (см. § 1, А. Штэссингер. Электрические машины), а направление вращения зависит от Φ_A , а не от Φ_s . ЭДС вращения E_{sd} представляет собою генераторно действующую ЭДС. Многоугольник напряжений цепи возбуждения, кроме того, содержит еще и часть напряжения у зажимов U_A , и падения напряжения, вызванные током возбуждения J_E .

При состоянии, близком к синхронному, индуктивное падение напряжения незначительно, так как в этом случае проходит постоянный ток. На диаграмме все ампер-витки складываются с ампер-витками намагничивания $J_m \cdot w_1$. Простоты ради, здесь не учтены потери в железе, передаточные числа и обмоточные коэффициенты.

В данном случае регулировка числа оборотов не может производиться так же просто, как при трехфазном шунтовом двигателе с питанием статора путем ответвления различных напряжений от обмотки статора; дело в том, что последняя оказывает лишь незначительное влияние на число оборотов, но вызывает сдвиг фазы воспринимаемого тока. Точка ответвления обмотки статора для цепи возбуждения выбирается так, чтобы при нормальной нагрузке $\cos \phi$ равнялся приблизительно 1. Однако, регулировка числа оборотов при помощи добавочного напряжения может быть осуществлена или в главной цепи, или в цепи возбуждения. Целесообразнее применять последний способ регулировки, для чего по оси щеток возбуждения устанавливается обмотка с ответвлениями, дающая необходимое напряжение для регулировки. Для соединения щеток возбуждения с точками ответвления требуется контроллер. Для каждого ответвления получается почти неизменное число оборотов при всех нагрузках. Регулировка, вообще говоря, возможна между $50 \div 120\%$ от синхронного числа оборотов.

Еще один недостаток заключается в том, что достаточный пусковой момент получается лишь при изменении соединения, а именно при соединении в качестве репульсионного двигателя.

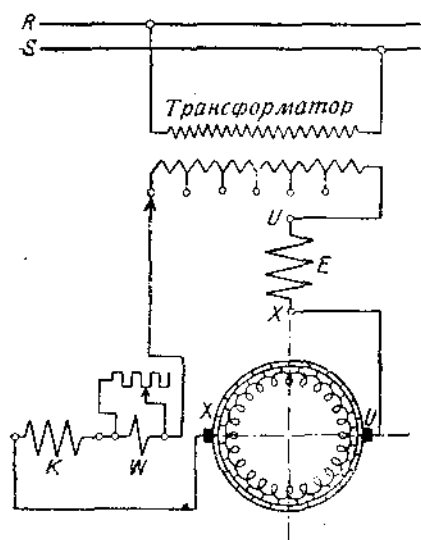
II. Однофазный серийный двигатель.

§ 5. Соединение и диаграмма времени.

У однофазного серийного двигателя¹⁾ (фиг. 318) в статоре находятся сосредоточенная обмотка возбуждения, компенсационная обмотка и обмотка дополнительных полюсов. Все они соединены последовательно с якорем. Ось обмотки возбуждения E перпендикулярна к оси щеток, тогда как оси компенсационной обмотки и обмотки дополнительных полюсов K и W расположены по направлению оси щеток якоря. В остальном соединение аналогично соединению серийного двигателя постоянного тока. С этим двигателем можно сравнить серийный двигатель однофазного переменного тока также и в том отношении, что при обмене местами проводов, подводящих ток к зажимам двигателя постоянного тока, момент вращения будет продолжать свое действие в прежнем направлении и не будет зависеть от

направления тока в подводящих проводах. На рис. 319 представлен однофазный серийный двигатель.

В однофазном серийном двигателе магнитный поток обмотки возбуждения Φ_v и магнитодвижущая сила якоря M_A благодаря последовательному соединению совпадают по фазе, что и требуется для образования момента вращения. В пространстве ось обмотки возбуждения перпендикулярна к оси щеток. ЭДС E_v , индуцированная этим потоком в обмотке возбуждения, как в трансформаторе, отстает во времени от этого потока на 90° . При вращении двигателя, благодаря магнитному потоку возбуждения, в якоре возникает ЭДС вращения E_r , сдвинутая относительно потока на 180° . Кроме того, на диаграмме рис. 320 отложены еще омическое и индуктивное падения напряжения, при чем величины R и X являются суммарными сопротивлениями всех по-



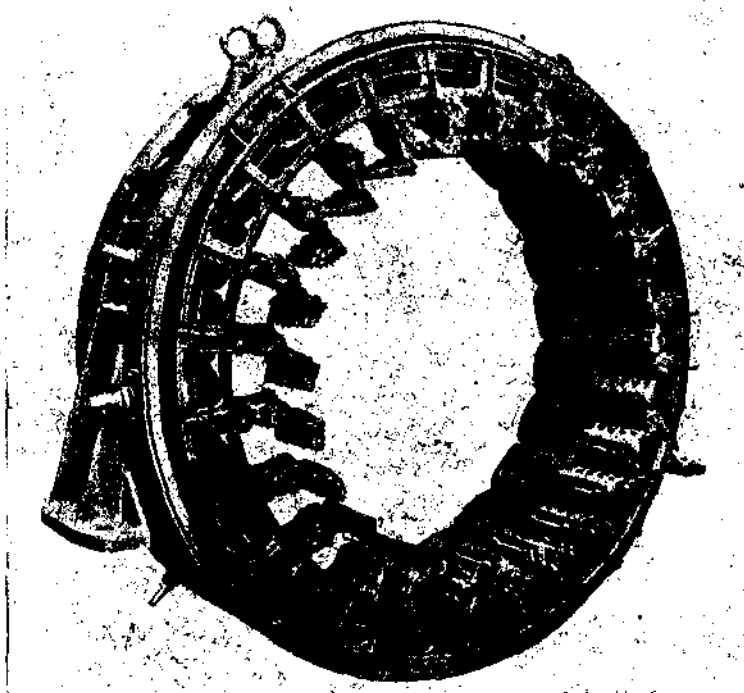
Фиг. 318. Схема однофазного серийного двигателя.

следовательно включенных обмоток, включая и обмотку якоря. Величины E_v , IR и JX при различных числах оборотов и неизменном токе не меняют своих значений. Величина же ЭДС вращения пропорциональна числу оборотов. По мере возрастания числа оборотов возрастает и E_r ; так что коэффициент мощности становится более благоприятным. У более мощных двигателей при нормальной работе $\cos \varphi_1$ равен около 0,95.

Для создания момента вращения потребуется, следовательно, поток возбуждения и перпендикулярная к нему в пространстве магнитодвижущая сила якоря. Якорь создает в направлении его магнитной оси, т.е. оси щеток, магнитный поток, не способствующий созданию момента вращения. Этот поток якоря вызвал бы, однако, значительную ЭДС самоиндукции, что повлекло бы к ухудшению коэффициента мощности. Для борьбы

¹⁾ G. Renischke. Die asynchronen Wechselstrommotoren, J. Springer, 1920—R. Richter, ETZ. 1906, S. 133—537. — Ossana, 1911, S. 581 и 614; Elektr. u. Masch.—Bau, 1916. — Korpczynski, El. Kraftbetr. u. Bahnen, 1922. — M. Schenkel, ETZ 1920, S. 26.

с этим явлением устраивается компенсационная обмотка, укладываемая, как и в машинах постоянного тока, в пазах полюсных башмаков и соединенная последовательно с главной цепью. Вместо включения компенса-



Фиг. 319. Однофазный серийный двигатель в тяговом деле (статор).

ционной обмотки в главную цепь, в однофазном серийном двигателе эту обмотку можно также замкнуть накоротко. В этом случае она ослабляет магнитный поток якоря, благодаря индуктированному в ней току, и действует, как вторичная обмотка коротко-замкнутого трансформатора.

§ 6. Коммутация.

В однофазных серийных двигателях вопрос о коммутации является особенно затруднительным. В секции, замкнутой накоротко щетками, индуктируются прежде всего две ЭДС.

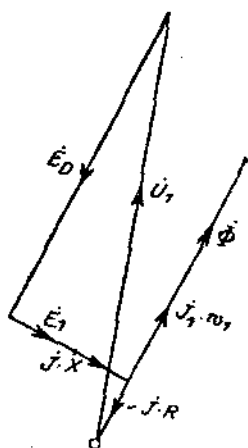
ЭДС трансформации пропорциональна числу периодов, числу коротко-замкнутых витков W_k и магнитному потоку, сцепленному с этими витками, пересекающими его полностью из-за перпендикулярного положения оси магнитного потока.

$$E_{KT} = \frac{2\pi}{V_2} f_1 \omega_k \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \dots \dots \dots (81)$$

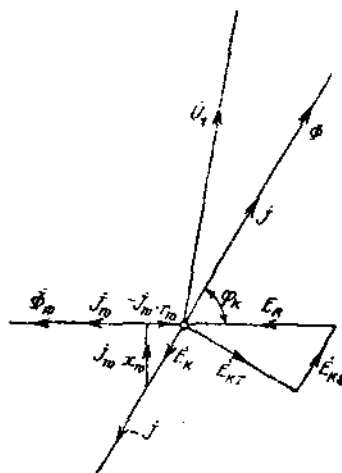
Магнитный поток должен существовать как при неподвижном якоре и при пуске, так и во время работы, ибо он необходим для создания момента вращения. ЭДС E_{KT} лишь тогда может колебаться в незначительных пределах, когда число периодов однофазного серийного двигателя выбирается меньшим, чем обычно. Число периодов, применяемое для

поездов дальнего следования, обычно — $16^{2/3}$, в отдельных случаях — также и 25 периодов. Однако, и при таком небольшом числе периодов должны быть приняты еще и другие меры для уменьшения величины E_{KT} . Так как ЭДС трансформации в коротко-замкнутой секции отстает от потока возбуждения на 90° , то она должна быть компенсирована соответствующим опережающим напряжением.

Кроме того, в коротко-замкнутой секции индуцируется ЭДС самоиндукции, возникающая также и в машинах постоянного тока. Величина ЭДС самоиндукции зависит от величины коммутированного тока и индуктивного сопротивления коротко-замкнутой секции. Коммутируемый ток здесь, как и в машине постоянного тока, равен току, проходящему по щеткам. ЭДС самоиндукции E_{KS} меняет свою величину с изменением



Фиг. 320. Диаграмма времени однофазного серпесного двигателя.



Фиг. 321. Диаграмма времени для напряжений в коротко-замкнутой секции однофазного серпесного двигателя.

числа периодов тока и, следовательно, совпадает по фазе с создающим ее током, так как время коммутации значительно меньше длительности одного периода тока. Так как магнитный поток якоря скомпенсирован, то в коротко-замкнутых секциях не будет больше возникать никаких ЭДС.

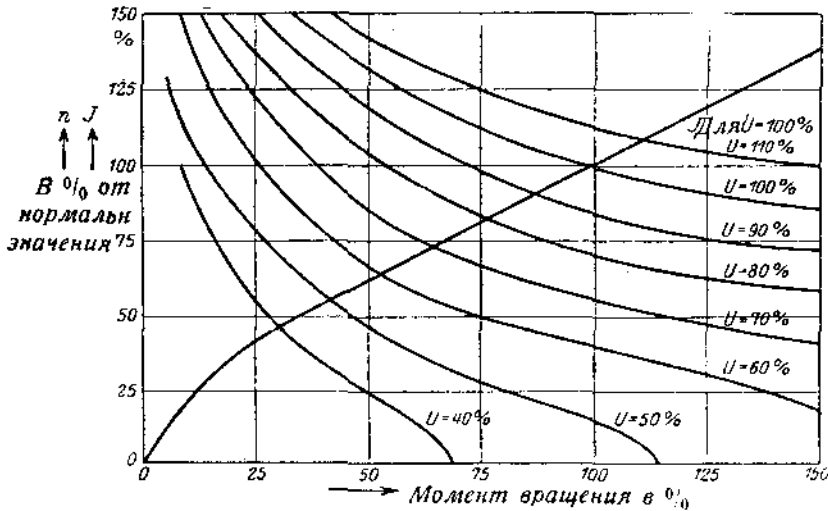
Результирующая величина E_K обеих ЭДС оказывается сдвинутой по фазе относительно J на угол φ_K (фиг. 321). ЭДС самоиндукции может быть уничтожена при помощи дополнительных полюсов, когда в коротко-замкнутой цепи, как и при машине постоянного тока, будет индуцироваться ЭДС, направленная противоположно ЭДС самоиндукции. Обмотка дополнительных полюсов также представляет собою сосредоточенную обмотку и должна находиться вдоль оси щеток. Эта обмотка должна создать поле, пропорциональное рабочему току, но направленное противоположно полю якоря. Поле дополнительных полюсов, однако, не уничтожает ЭДС трансформации. Для уничтожения последней необходимо присоединить параллельно к обмотке дополнительных полюсов некоторое сопротивление. В то время когда через это безиндукционное, параллельно присоединенное сопротивление будет проходить ток — J , сдвинутый по фазе относительно рабочего тока на 180° , — через обмотку дополнительных полюсов, индуктивное сопротивление которой больше ее омического сопротивления, будет проходить частичный ток J_w . Последний, при пра-

вильном расчете, будет отставать от тока J на угол φ_k . Если дополнительное поле создается таким током, то E_R может быть полностью уничтожена. Полное уничтожение этого напряжения без изменения параллельно включенного сопротивления возможно, конечно, лишь для определенных пределов нагрузок, вне которых наблюдается некоторое остаточное напряжение. Для того, чтобы коммутация была удовлетворительной, остаточное напряжение не должно превышать значения в 3 вольта даже при пользовании твердыми щетками с большим сопротивлением. Уничтожение напряжения E_R при помощи параллельного сопротивления протекает благоприятнее, чем уменьшение компенсационной обмоткой ЭДС трансформации $E_{кт}$. В этом случае обмотке дополнительных полюсов предстоит уравновесить лишь напряжение самоиндукции. Компенсационная обмотка должна быть взята более мощной, так как короткозамкнутая секция должна быть расположена в поле, соответствующем дополнительному полю.

Однако, полное уничтожение остаточного напряжения путем создания трансформаторной ЭДС, целиком уравновешивающей напряжение $E_{кт}$ в коротко-замкнутой секции, возможно лишь для некоторых определенных нагрузок.

§ 7. Работа двигателя и рабочие кривые.

Момент вращения пропорционален току и созданному им магнитному потоку. При небольших насыщениях железа момент вращения изменяется поэтому пропорционально квадрату силы тока. Таким образом, двигатель оказывается с серийной характеристикой. При уменьшении момента вращения число оборотов возрастает и при холостом ходе достигает



Фиг. 322. Число оборотов для различных напряжений, а также сила тока в зависимости от момента вращения.

очень больших значений, так как для создания ЭДС вращения при незначительном потоке требуется значительное число оборотов. Для регулировки числа оборотов служит трансформатор со многими ответвлениями со стороны вторичной обмотки; такой трансформатор почти всегда необходим для уменьшения напряжения в троллейном проводе. Применяя, кроме трансформатора с ответвлениями, еще и трехфазный трансформатор,

можно достигнуть плавной регулировки числа оборотов. Эксплуатационные кривые (фиг. 322) дают зависимости n и I от момента вращения при различных ответвлениях трансформатора, при чем нормальное рабочее напряжение принято равным 100%. Нормальный предел регулировки колеблется между 20 — 150% от нормального числа оборотов, соответствующего синхронному.

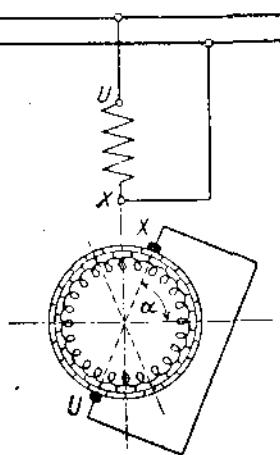
Для перемены направления вращения может быть изменено направление тока или в обмотке возбуждения, или в якоре. Почти всегда предпочитают изменять направление тока в обмотке возбуждения, так как при переключении якоря пришлось бы переключить также и компенсационную обмотку и обмотку дополнительных полюсов.

III. Репульсионный двигатель.

§ 8. Схема и векторная диаграмма.

Схема репульсионного двигателя ¹⁾ с коротким замыканием по диаметру видна из фиг. 323; на фиг. 324 представлен внешний вид репульсионного мотора в 22 kW с коротким замыканием по хорде (фиг. 326a) и с пределом регулировки 750—1500—1650 об./мин. Репульсионный двигатель работает с одним магнитным потоком якоря; обмотка статора служит для индуктирования рабочего тока.

Для пуска коротко-замкнутые коллекторные щетки устанавливаются в нулевое положение, перпендикулярное к оси потока. ЭДС трансформации, индуктированные в проводах якоря, в этом случае уничтожаются и через статор проходит лишь ток, потребный для намагничивания. Для создания момента вращения недостает тока в якоре.



Фиг. 323. Схема репульсионного двигателя с коротким замыканием по диаметру.

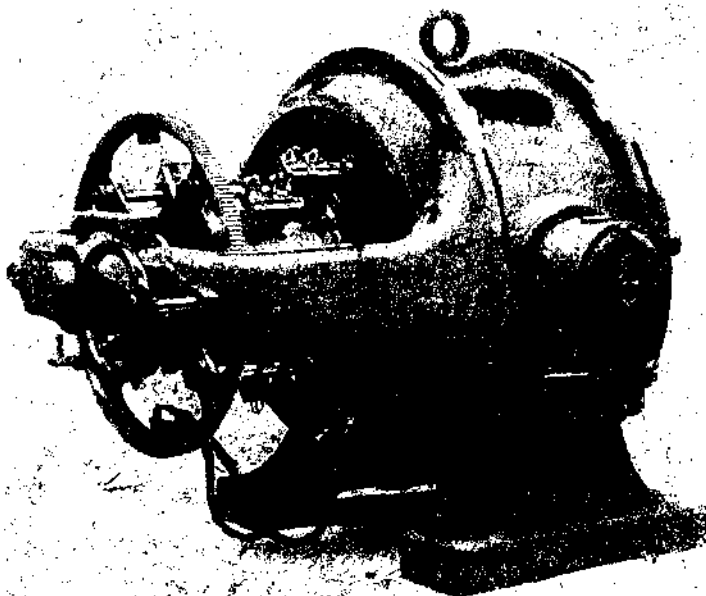
Если теперь сдвинуть щетки с этого положения на угол α (с тем, однако, чтобы расстояние между ними сохранить неизменным), то через якорь потечет ток, так как теперь ЭДС трансформации уничтожаются лишь частично. Якорь начинает вращаться. Для создания момента вращения служит поток якоря Φ_A , расположенный в пространстве перпендикулярно к оси обмотки статора. Поток якоря создается ампер-витками, расположенными на якоре по обе стороны от оси потока статора, т.-е., следовательно, в угле $2\pi - 4\alpha$. Магнитный поток якоря образует момент вращения благодаря току в остальных проводах якоря, расположенных по обе стороны горизонтальной оси якоря в угле 4α . Эта часть обмотки считается рабочей частью. По правилу левой руки, зная направление потока Φ_A и направление тока в якоре, можно определить и направление вращения. Таким образом, направление вращения оказывается всегда противоположным направлению сдвига щеток с пускового положения. В нормальном рабочем положении щетки сдвинуты с нулевого положения приблизительно на $70 - 75^\circ$.

При сдвиге щеток до положения по оси обмотки статора, т.-е. в положение короткого замыкания, момент вращения снова становится равным нулю, так как снова отсутствует магнитный поток в якоре. Для

¹⁾ Siegel, Elektrot. u. Masch.-Bau, 1921;—M. Schenkel, ETZ, 1920, S. 26.

того, чтобы избежать этого положения короткого замыкания, связанного с возникновением больших токов, на расстоянии $\alpha = 85^\circ$ устраивается приспособление, ограничивающее сдвиг щеток. Векторная диаграмма (фиг. 325) во многом сходна с однофазным шунтовым двигателем. Поток статора Φ_s индуцирует отстающую на 90° ЭДС E как в обмотке статора (где она суммируется с омическим и индуктивным падениями напряжения, что дает напряжение у зажимов U_1), так и в обмотке якоря. Последняя ЭДС обозначена на диаграмме времени E_{st} .

Магнитодвижущая сила статора пропорциональна $I_1 w_1$ и дает в сумме с ампер-витками намагничивания (совпадающими по фазе с Φ_s) магнитодвижущую силу якоря. В якоре ток I_a вызывает омическое и индуктивное падения напряжения. С током I_a совпадает по фазе поток якоря Φ_a .



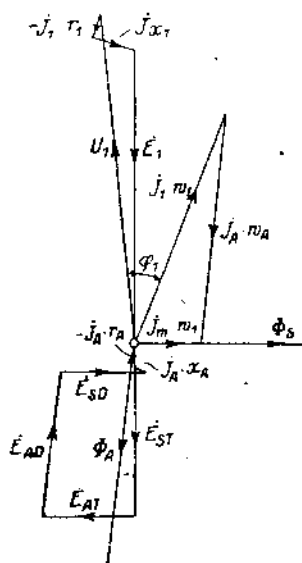
Фиг. 324. Репульсионный двигатель в 22 kW.

По отношению к последнему отстает по фазе на 90° ЭДС E_{at} , вызванная потоком Φ_a . Противоположно по фазе с потоком Φ_a находится ЭДС вращения E_{ad} . Последней действующей в якоре ЭДС является ЭДС вращения E_{sd} , возникающая благодаря потоку Φ_s . E_{sd} совпадает по фазе с потоком Φ_s , ибо, как и в однофазном шунтовом двигателе, направление вращения определяется по магнитному потоку якоря, а не по потоку Φ_s . ЭДС E_{sy} и E_{ad} индуцируются в проводах, расположенных в рабочей части, а ЭДС E_{sd} и E_{at} индуцируются в частях, находящихся по обе стороны от оси статора, и все время уничтожаются в других частях обмотки якоря.

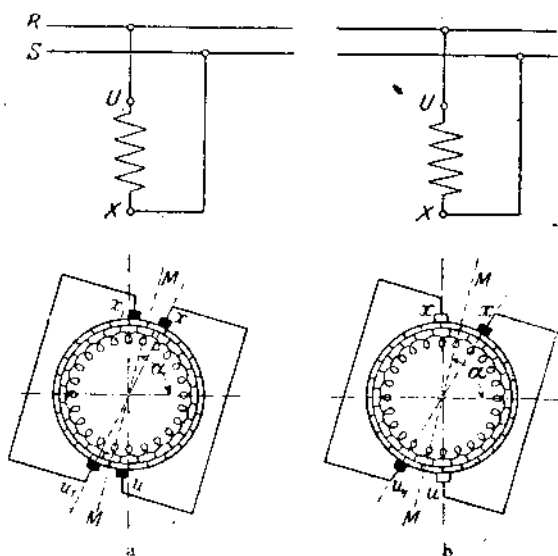
У репульсионного двигателя коммутация благоприятнее всего протекает при числах оборотов ниже синхронных. Так как, благодаря положению щеток, коротко-замкнутые витки пронизываются как потоком статора, так и потоком ротора, то в них индуцируются такие же ЭДС, как и в остальном якоре, и с такими же сдвигами фаз (фиг. 325). Также и здесь они почти уничтожаются при состоянии, близком к синхронному. К этим ЭДС

присоединяется, однако, еще и ЭДС самоиндукции, совпадающая по фазе с током якоря. Так как при вращении с числом оборотов ниже синхронного напряжение E_{AD} меньше E_{ST} , то ЭДС самоиндукции здесь уничтожается и коммутация протекает благоприятнее, чем при синхронизме и, особенно, чем при числе оборотов выше синхронного.

У репульсионного двигателя при нормальной его конструкции короткозамкнутые щетки большей частью устанавливаются не по диаметру, как на фиг. 323, а по хорде, согласно фиг. 326 а. Принцип действия при этом



Фиг. 325. Диаграмма времени репульсионного двигателя.



Фиг. 326. Репульсионный двигатель; а) с коротким замыканием по хорде. б) по схеме Дери с подвижным комплектом щеток.

остается тот же. При коротком замыкании по хорде соединяются между собой две щетки, образующие друг с другом постоянный угол около 140° до 150° . Через ту часть якоря, которая не находится между короткозамкнутыми щетками, ток не проходит. При этом в нулевом положении, в котором средняя ось $M-M$ совпадает с осью потока якоря, коммутация, коэффициент полезного действия и коэффициент мощности становятся более благоприятными.

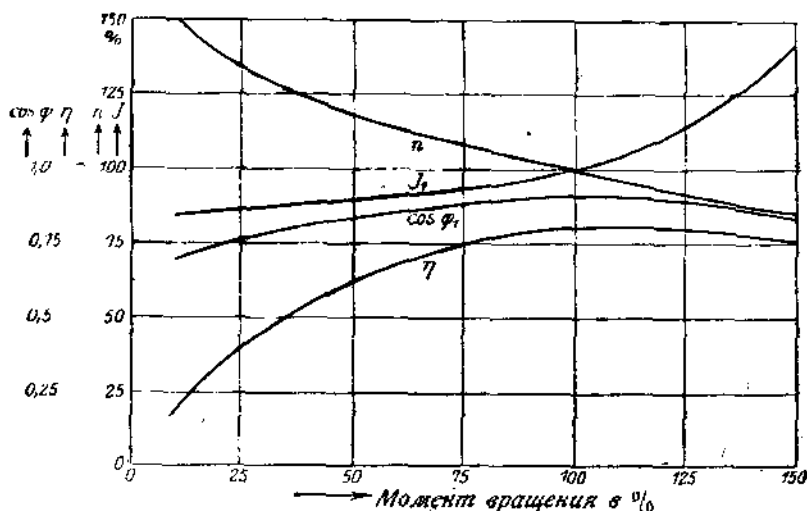
При устройстве по способу Дери (Déri) щетки $u-x_1$ остаются на своем месте (фиг. 326 б), а перемещаются лишь щетки u_1 и x , что дает двойную величину сдвига щеток, а следовательно, и более тонкую регулировку числа оборотов.

§ 9. Работа и рабочие кривые.

Преимущества, связанные с применением репульсионного двигателя, заключаются не только в независимости статорной обмотки от якорной, но и в простоте регулировки при помощи сдвига щеток и ненужности дополнительного оборудования.

У репульсионного двигателя момент вращения зависит от квадрата силы тока, как и у однофазного серийного двигателя, так как полезный поток создается в нем током якоря. Поэтому репульсионный двигатель имеет серийную характеристику. При падении нагрузки число оборотов должно

возрастать для того, чтобы векторная диаграмма напряжений оказалась замкнутой. Для предохранения двигателей с мощностью до 20 кВт от слишком больших чисел оборотов можно устроить на якоре центробежный рубильник, соединяющий между собою три симметрично расположенные друг относительно друга точки обмотки постоянного тока, вследствие чего двигатель превращается в однофазный индукционный. Другими средствами для предотвращения чрезмерно большого числа оборотов является устройство в якоре коротко-замкнутой беличьей клетки или же, у мощных двигателей, устройство центробежного выключателя, отключающего двигатель от сети. На фиг. 327 представлены эксплуатационные кривые при нормальной установке щеток. Пусковой момент вращения репульсионного двигателя сильно зависит от установки щеток. Как правило, максимальная



Фиг. 327. Эксплуатационные кривые однофазного репульсионного двигателя с коротким замыканием по хорде при неизменном положении щеток. Ток в статоре, число оборотов, к. п. д. и $\cos \varphi$ в зависимости от момента вращения.

его величина достигает 2,5-кратной величины нормального момента. В краях иногда используется и тормозящее действие. В этом случае щетки должны быть сдвинуты против обычного направления смещения. Репульсионный двигатель превращается при этом в генератор. Однако, из-за сильного искрения щеток двигатель может работать в положении торможения лишь в продолжение короткого времени.

Обычно пределы регулировки числа оборотов лежат между 0,5—1,1 от синхронного числа оборотов. Перемена направления вращения осуществляется лишь при помощи сдвига щеток. У репульсионного двигателя с коротким замыканием по хорде и при соединении по Дэри оказывается возможным менять направление вращения без выключения обмотки статора. Если перемена направления вращения, как, например в подъемных двигателях, должна осуществляться не путем сдвига щеток, а путем управления на расстоянии, то устраивают в статоре две вспомогательные обмотки, дающие сдвиг оси потока статора относительно неподвижных щеток. Коэффициент мощности определяется, главным образом, по намагничивающему току обмотки статора. Для нормального числа оборотов почти при синхронизме этот коэффициент равен приблизительно 0,9.

II. Преобразователи.

Дипл. инж. Макс Цорн (Max Zorn), Берлин.

А. Общие сведения о преобразователях.

Под преобразователями подразумеваются электрические машины, преобразующие путем вращения систему тока, напряжение, число фаз или число периодов электрической энергии. Сюда, следовательно, не относятся ни трансформаторы, ни выпрямители.

В качестве преобразователей применяются:

1. Мотор-генератор, состоящий из двух машин, соединенных механически, но все же разделенных в электрическом отношении; при этом электрическая энергия переходит в механическую, а последняя снова превращается в электрическую энергию.

2. Одноякорный преобразователь, представляющий собою машину постоянного тока, у которой обмотка якоря соединяется не только с коллекторными пластинами, но еще и с контактными кольцами; здесь электрическая энергия из одного вида непосредственно переходит в другой.

3. Каскадный преобразователь, состоящий из асинхронной машины и одноякорного преобразователя; здесь обе машины соединены как механически, так и электрически и являются комбинацией типов, упомянутых в пп. 1 и 2. Обмотка ротора асинхронной машины соединена последовательно (в каскад) с обмоткой якоря одноякорного преобразователя.

В отдельности каждая машина, составляющая мотор-генератор, была уже рассмотрена в другом месте книги. В дальнейшем остается лишь рассмотреть одноякорный и каскадный преобразователи для преобразования переменного тока в постоянный или наоборот.

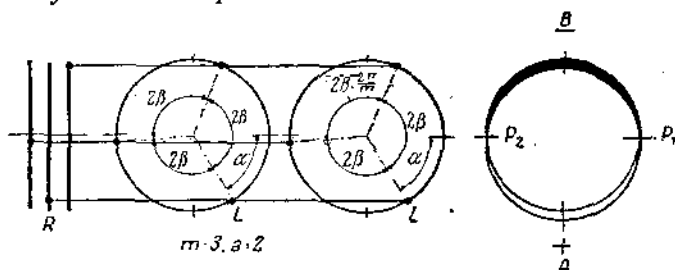
В. Одноякорный преобразователь.

§ 1. Общие сведения.

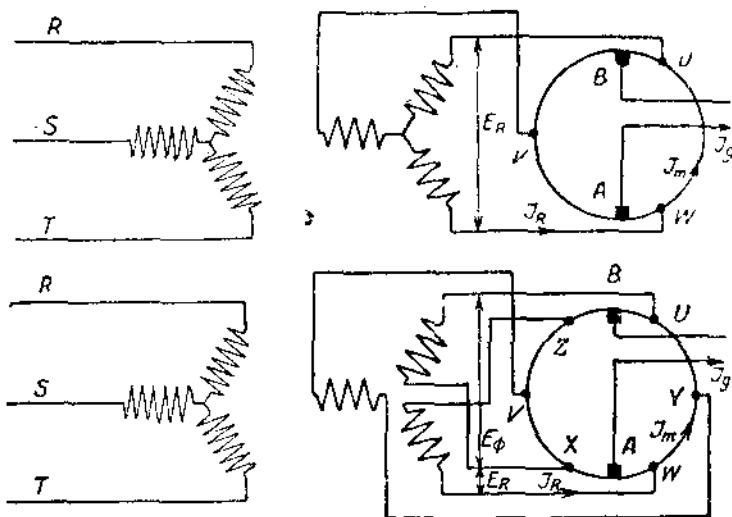
По расчету и конструкции одноякорный преобразователь аналогичен машине постоянного тока и отличается от последней лишь тем, что в обмотке его якоря на одинаковых расстояниях сделаны ответвления, соединяемые с контактными кольцами. Через щетки к этим кольцам подводится, или от них получается переменный ток, в зависимости от того, преобразует ли одноякорный преобразователь переменный ток в постоянный или наоборот. Как уже было упомянуто в главе о машине постоянного тока, обмотка якоря состоит из a пар параллельных ветвей, находящихся в одинаковых условиях в смысле напряжения и тока. Машину постоянного тока можно поэтому рассматривать так же как группу из a отдельных параллельно соединенных двухполюсных машин.

На фиг. 328 это представлено для случая $a=2$. Через A обозначено положение положительной щетки в нейтральной зоне, а через B — поло-

жение отрицательной щетки, P_1 — середина одного главного полюса, P_2 — середина другого главного полюса. При движении проводника, например, верхнего слоя обмотки от точки P_1 через A , P_2 , B к середине ближайшего полюса той же полярности, пройдет электрический угол $\alpha = 2\pi$. Каждая точка проводника будет при этом иметь потенциал, который при синусоидальном поле будет также изменяться по синусоидальной функции $\varphi \cdot \sin \alpha$, как указано на фиг. 328.



Фиг. 328. Схема обмотки якоря постоянного тока с присоединением контактных колец; $a = 2$, $m = 3$.



Фиг. 329 и 330. Схема соединения одноякорного преобразователя с трансформатором; $m = 3$ и 6.

Точки L отдельных пар ветвей, имеющие в каждый момент одинаковые потенциалы ($\alpha = \alpha'$) подводятся в одноякорном преобразователе к одному общему контактному кольцу R . В преобразователе с m кольцами от каждой пары ветвей устроено m ответвлений на одинаковых расстояниях, равных $2\beta = \frac{\pi}{m}$ электрических градусов и каждое из этих ответвлений соединено с соответствующим кольцом. Часть обмотки, находящуюся между двумя соседними соединениями, мы будем называть фазами.

Если в одной фазе с парой ветвей заключено l проводников, то общее число проводов якоря будет составлять $z = a \cdot m \cdot l$; при сопротивлении каждого провода, равно r , общее сопротивление якоря будет

$$R_a = \frac{z \cdot r}{(2a)^2} = \frac{a \cdot m \cdot l}{(2a)^2} \cdot r \dots \dots \dots (1)$$

В зависимости от числа ответвлений к кольцам в каждом из a пар ветвей мы имеем:

однофазный преобразователь с 2 кольцами ($m=2$, т.е. 2 части обмотки на пару ветвей),

трехфазный преобразователь с 3 кольцами ($m=3$),

четырефазный преобразователь с 4 кольцами ($m=4$),

шестифазный преобразователь с 6 кольцами ($m=6$),

двенадцатифазный преобразователь с 12 кольцами ($m=12$).

Самыми употребительными являются трехфазные и шестифазные преобразователи; их схема и соединение их с трансформатором представлены на фиг. 329 и 330. Трансформатор шестифазного преобразователя отличается от трансформатора трехфазного преобразователя тем, что три фазы его вторичной обмотки открыты.

Число оборотов в минуту (n), число пар полюсов (p) и число периодов (f) связаны здесь друг с другом следующим соотношением:

$$f = \frac{p \cdot n}{60}.$$

§ 2. Соотношения между напряжениями.

В одном витке вращающегося якоря машины постоянного тока индуцируется ЭДС

$$e' = - \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ вольт.} \quad (2)$$

При синусоидальном распределении поля по окружности якоря величина этой ЭДС при постоянной скорости вращения якоря будет изменяться во времени также по закону синуса и эффективные значения ЭДС отдельных витков e'_1, e'_2 могут геометрически складываться, как указано на фиг. 331.

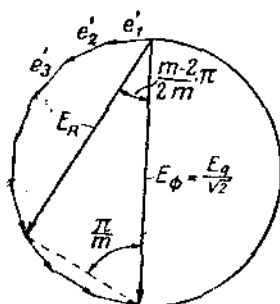
При отсутствии тока в якоре, ЭДС в какой-либо части обмотки равна напряжению, измеряемому у зажимов этой обмотки. При наличии тока в якоре величина напряжения будет отличаться от величины ЭДС на величину омического и индуктивного падения напряжения. Простоты ради, рассмотрим якорь при отсутствии в нем тока. Максимальное переменное напряжение возникает между двумя точками, удаленными друг от друга на 180 электрических градусов, а его максимальное значение равно постоянному напряжению E_g между двумя щетками постоянного тока различной полярности, расположенными в нейтральных зонах. Эффективное значение этого переменного напряжения, называемого в дальнейшем диаметральной напряжением, равно:

$$E_* = \frac{E_g}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

Исходя из этой величины, легко определить фазовое напряжение E_x между двумя соседними кольцами одноякорного преобразователя с m контактными кольцами через постоянное напряжение E_g (фиг. 331).

Фазовое напряжение составляет

$$E_x = \frac{E_g}{\sqrt{2}} \cdot \sin \frac{\pi}{m} \quad (4)$$



Фиг. 331. Напряжения в паре ветвей обмотки.

Отсюда получается отношение напряжений

$$\mu = \frac{E_R}{E_g} = \frac{\sin \frac{\pi}{m}}{\sqrt{2}} \dots \dots \dots (5)$$

Это отношение действительно лишь для синусоидального распределения потока и при отсутствии тока в якоре; оно изменяется с изменением величины коэффициента перекрытия

$$\gamma = \frac{\text{полюсная дуга}}{\text{полюсное деление}},$$

влияющего на кривую поля.

При нагрузке отношение μ отклоняется на несколько процентов, так как оно, как уже сказано, действительно лишь для напряжений E_R' , E_g' , индуктированных полем.

Из нижеприведенной таблицы можно получить отношение напряжений

$$\mu = \frac{E_R'}{E_g'}$$

для встречающихся чисел фаз и полюсных перекрытий.

Таблица 1.

$\gamma = \frac{\text{полюсная дуга}}{\text{полюсное деление}}$	0,75	0,7	Синусоидальное поле	0,65	0,6
1 фаза 2 кольца . . .	0,69	0,71	0,707	0,73	0,75
3 фазы 3 " . . .	0,60	0,62	0,612	0,64	0,66
4 " 4 " . . .	0,49	0,50	0,500	0,52	0,53
6 фаз 6 колеи . . .	0,347	0,354	0,354	0,367	0,377
12 " 12 " . . .	0,182	0,185	0,185	0,192	0,197

Из-за строго определенного соотношения между переменным и постоянным напряжениями одноякорный преобразователь почти во всех случаях может быть приключен к сети переменного тока только через трансформатор.

§ 3. Соотношения токов и джоулевых потерь в якоре.

Пусть N — воспринимаемая мощность переменного тока, а $\cos \varphi$ — коэффициент мощности преобразователя, следовательно, φ — угол сдвига фаз между током и напряжением. Переменный ток J_R в каждом кольце определяется тогда из формулы

$$J_R = \frac{N}{m \cdot \frac{E_g}{2} \cdot \cos \varphi} \dots \dots \dots (6)$$

При работе в качестве синхронного двигателя преобразователь в каждой из m частей (фаз) обмотки одной пары ветвей имел бы переменный ток, равный

$$i_m = \frac{N}{a \cdot m \cdot E_R \cdot \cos \varphi}.$$

Последний равнялся бы переменному току, проходящему в каждом проводнике якоря. Сумма переменных токов, проходящих по a параллельно включенным частям обмотки (эта сумма называется в дальнейшем фазовым током), составляла бы, таким образом,

$$J_m = a \cdot i_m = \frac{N}{m \cdot E_R \cdot \cos \varphi} \dots \dots \dots (7)$$

Отдаваемая мощность постоянного тока преобразователя равна $E_g \cdot J_g = \eta \cdot N$, где J_g означает постоянную силу тока, а η — коэффициент полезного действия. Если преобразователь, работая генератором постоянного тока, отдавал бы такую силу тока, то через каждый проводник якоря проходил бы постоянный ток, равный

$$i_g = \frac{J_g}{2a}.$$

Мы имели бы тогда

$$J_g = 2ai_g \dots \dots \dots (8)$$

Между всеми этими токами существуют следующие соотношения:

$$m \frac{E_\Phi}{2} \cdot J_R \cdot \cos \varphi \cdot \eta = m E_R \cdot J_m \cdot \cos \varphi \cdot \eta = E_g \cdot J_g \dots \dots \dots (9)$$

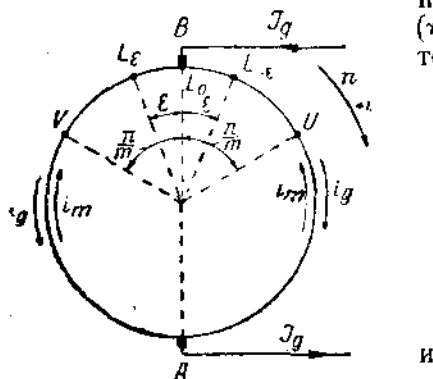
При преобразовании постоянного тока в переменный здесь следует заменить величину η через $\frac{1}{\eta}$. Пренебрегая незначительными падениями напряжения в обмотке (для чего напряжения заменяем ЭДС) и принимая отношения из ур. (3) и (5) действительными для синусоидального поля, мы получим для преобразователя без потерь ($\eta = 1$) и с $\cos \varphi = 1$ следующие отношения токов:

$$\frac{J_m}{J_R} = \frac{1}{2 \sin \frac{\pi}{m}} \dots \dots \dots (10)$$

$$\frac{J_R}{J_g} = \frac{2\sqrt{2}}{m} \dots \dots \dots (11)$$

$$\frac{J_m}{J_g} = \frac{\sqrt{2}}{m \sin \frac{\pi}{m}} \dots \dots \dots (12)$$

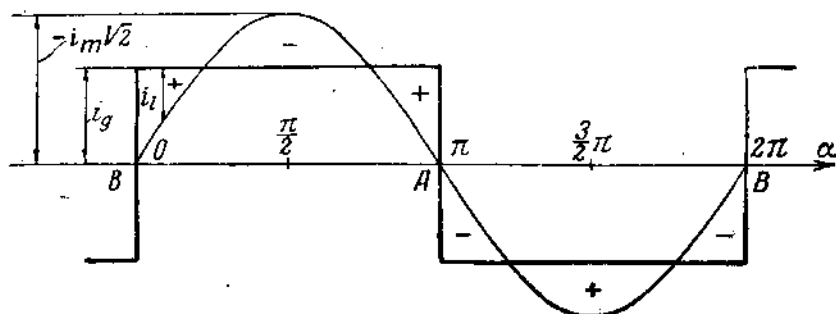
$$\frac{i_m}{i_g} = \frac{2\sqrt{2}}{m \cdot \sin \frac{\pi}{m}} \dots \dots \dots (13)$$



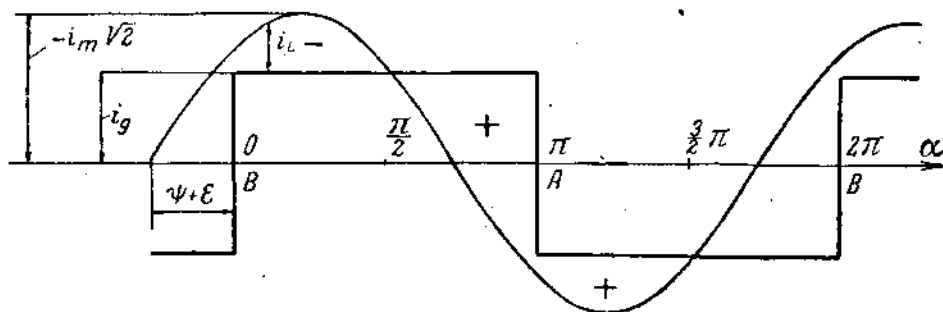
Фиг. 332. Токи в паре ветвей обмотки.

Для определения джоулевых потерь рассмотрим токи в обмотке якоря двухполюсного преобразователя по фиг. 332. Так как одноякорный преобразователь является одновременно двигателем и генератором, то в нем переменный и постоянный токи имеют противоположные направления и по обмотке якоря течет лишь разность обоих токов. Пусть A и B — щетки постоянного тока в нейтральной зоне, U и V — два присоединения к контактным кольцам, следовательно, конечные точки одной фазы. За положительное направление вращения и направление тока якоря принято направление по часовой стрелке. Преобразователь преобразует переменный ток в постоянный. В ветви $B \rightarrow A$ проходил бы постоянный ток $+i_g$, в $A \rightarrow B$

проходил бы ток $-i_g$, а в фазе $U-V$ — переменный ток с амплитудой $i_m \cdot \sqrt{2}$. В тот момент, когда середина фазы L_0 расположена в нейтральной зоне, ЭДС между U и V равна нулю, а при равенстве фаз переменных ЭДС и силы тока мгновенное значение i_m также равно нулю. При передвижении середины фазы от B к A будет проходить переменный ток $i_m \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \alpha$ от U к V (следовательно, отрицательный ток) и достигнет своего максимального значения $i_m \sqrt{2}$ в тот момент, когда L_0 будет находиться между B и A ($\alpha = \frac{\pi}{2}$). Угол α представляет собою электрический угол, проходимый серединой фазы от точки B , и является, следовательно, мерой для времени $t = \frac{\alpha}{\omega}$, где ω — электрическая угловая скорость. Между



Фиг. 333. Изменение силы тока в проводнике $\psi = 0$; $\epsilon = 0$.



Фиг. 334. Изменение силы тока в проводнике $\psi + \epsilon \neq 0$.

A и B токи меняют свое направление. Через проводник якоря L_0 , расположенный в середине фазы, по мере описания им дуги $\alpha = 2\pi$, т.е. в продолжение одного периода, будут проходить токи, имеющие характер, изображенный на фиг. 333. Наложение этих токов даст в действительности лишь разностный ток $i_L = i_g - i_m \sqrt{2} \sin \alpha$. Коммутация постоянного тока совпадает здесь с изменением направления переменного тока.

Если переменный ток сдвинут относительно ЭДС (напр. опережает ее) на угол ψ , то переменный ток достигнет в L_0 нулевого значения до момента коммутации и ток в проводнике будет меняться согласно функции

$$i_L = i_g - i_m \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\alpha + \psi),$$

где $+\psi$ — опережающий угол.

В проводнике L_s , удаленном от середины фазы L_0 на электрический угол ϵ в сторону, противоположную вращению якоря, переменный ток

будет достигать нулевого значения раньше на угол ε . В проводнике же, удаленном от L_0 на такой же угол ε в сторону вращения якоря, следовательно, на угол $-\varepsilon$, величина i_m достигнет нуля лишь на ε° после коммутации. Таким образом, ток в якоре в общем случае будет изменяться, согласно функции

$$i_g = i_g - i_m \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\alpha + \psi + \varepsilon) \dots \dots \dots (14)$$

(см. фиг. 334). Отсюда следует, что джоулевы потери $r \cdot i_g^2$ в каком-либо проводнике L_g меняются также в зависимости от времени (α). Среднюю величину этих потерь мы получим путем интегрирования, а именно:

$$v_l = \frac{r}{\pi} \int_0^\pi i_l^2 \cdot d\alpha = r \cdot \left[i_g^2 + i_m^2 - \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \cdot i_g \cdot i_m \cdot \cos(\psi + \varepsilon) \right] \dots \dots (15)$$

Из этой формулы видно, что в различных проводниках одной фазы наблюдаются джоулевы потери различной величины, при чем наименьшие потери будут в том проводнике, для которого $\psi + \varepsilon = 0$. При $\cos \psi = 1$ речь идет о проводнике L_0 середины фазы.

Если в одной фазе имеется l проводников, заключенных в электрическом угле $2\beta = 2\frac{\pi}{m}$, то на одну угловую единицу приходится $\frac{l \cdot m}{2\pi}$ проводников. Интегрирование средних потерь во времени для отдельных проводников между $-\beta$ и $+\beta$ дает средние потери в одной фазе

$$v_m = \frac{l \cdot m}{2\pi} \cdot r \int_{-\frac{\pi}{m}}^{+\frac{\pi}{m}} \left[i_g^2 + i_m^2 - \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \cdot i_g \cdot i_m \cdot \cos(\psi + \varepsilon) \right] d\varepsilon = \left\{ \dots \dots (16) \right.$$

$$\left. = l \cdot r \left(i_g^2 + i_m^2 - \frac{4\sqrt{2}}{\pi^2} \cdot m \cdot i_g \cdot i_m \cdot \cos \psi \cdot \sin \frac{\pi}{m} \right) \right\} \dots$$

При наличии у преобразователя m колец и $2a$ параллельных ветвей якоря (в нашем примере $a=1$) средние суммарные джоулевы потери во времени для якоря будут составлять $V_a = m \cdot a \cdot v_m$. Отсюда, из суммарного сопротивления якоря

$$R_a = \frac{m \cdot a \cdot l}{(2a)^2} \cdot r = \frac{m \cdot l}{4a} \cdot r \text{ (ур. 1)}$$

и из суммарных токов

$$J_g = 2 \cdot a \cdot i_g \text{ и } J_m = a \cdot i_m \text{ (ур. 8 и 7)}$$

мы получаем

$$V_a = R_a \left(J_g^2 + 4 J_m^2 - \frac{8\sqrt{2}}{\pi^2} \cdot m \cdot J_g \cdot J_m \cdot \cos \psi \cdot \sin \frac{\pi}{m} \right).$$

Написав для J_m его значение из ур. (10), а именно $\frac{J_R}{2 \sin \frac{\pi}{m}}$, и пренебрегая незначительной разницей между $\cos \psi$ и $\cos \varphi$, мы получим уравнение

$$V_a = R_a \left[J_g^2 + \frac{J_R^2}{\sin^2 \frac{\pi}{m}} - \frac{4\sqrt{2}}{\pi^2} \cdot m \cdot J_g \cdot J_R \cdot \cos \varphi \right] \dots \dots \dots (17)$$

Это уравнение имеет то преимущество, что величина V_a здесь может быть определена из 4 величин поддающихся измерению или приводимых на заводской табличке. Если такой же ток J_g проходил бы через преобразователь при работе его в качестве генератора постоянного тока, то джоулевы потери были бы равны $V_a' = R_a \cdot J_g^2$. Отношение $\frac{V_a}{V_a'}$ мы обозначим через c и получим

$$V_a = c \cdot R_a \cdot J_g^2 \quad (18)$$

Из ур. (17) и (18) следует, что

$$c = 1 + \left(\frac{J_R}{J_g}\right)^2 \cdot \frac{1}{\sin^2 \frac{\pi}{m}} - \frac{J_R}{J_g} \cdot \frac{4\sqrt{2}}{\pi^2} m \cdot \cos \varphi$$

Для преобразователя без потерь мы имеем

$$\frac{J_R}{J_g} = \frac{2\sqrt{2}}{m \cdot \cos \varphi}$$

и для него, следовательно, будет

$$c = 1 + \frac{8}{m^2 \sin^2 \frac{\pi}{m}} \cdot \cos^2 \varphi - \frac{16}{\pi^2} \quad (19)$$

В приведенной ниже таблице даны значения этого коэффициента c для преобразователей без потерь, имеющих синусоидальное поле. Данные приведены для самых употребительных чисел фаз и для $\cos \varphi = 1, 0,9$ и $0,8$. Кроме того, дано отношение $\frac{J_R}{J_g}$ при $\cos \varphi = 1$, а также дан коэффициент c введенный в правила для оценки и испытаний электрических машин, в этом коэффициенте c учтена величина η .

Таблица 2.

Число фаз	Число колец	c для $\cos \varphi =$			$\frac{J_R}{J_g}$	c по нормам 1923 г.
		1	0,9	0,8		
1	2	1,38	1,85	2,5	1,414	1,45
3	3	0,57	0,84	1,23	0,943	0,58
4	4	0,38	0,61	0,94	0,707	0,39
6	6	0,27	0,48	0,77	0,471	0,27
12	12	0,23	0,41	0,68	0,236	0,20

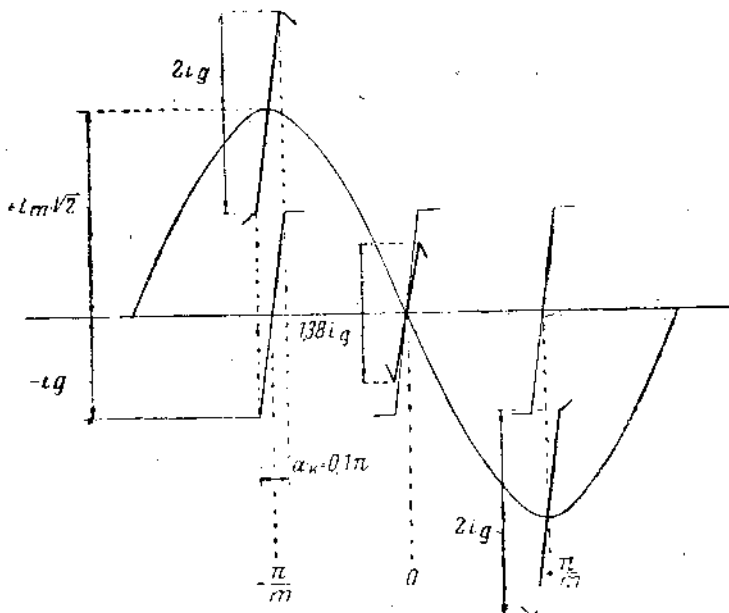
§ 4. Коммутация.

Благодаря прохождению по якору переменного тока коммутация у одноякорного преобразователя несколько отличается от коммутации у машины постоянного тока. На этой разнице мы остановимся несколько подробнее. Коммутация тока происходит в электрическом угле

$$\alpha_k = \frac{b}{\pi d_k} \cdot \pi = \frac{2p \cdot b}{d_k} \quad (20)$$

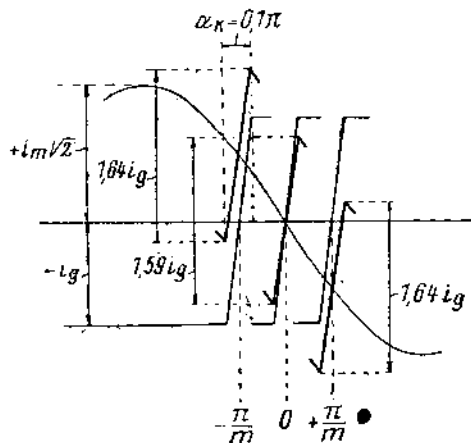
Здесь d_k — диаметр коллектора, p — число пар полюсов и b — ширина щетки, измеренная в направлении окружности коллектора. Правда, переменный ток, проходящий по якору, вызывает во время коммутации

неодинаковое изменение тока в отдельных проводах одной фазы. Однако, при α_k , малом в сравнении с π , и при наличии у преобразователя большого числа контактных колец эти различия становятся ничтожными, а изменения тока близкими к значению $2i_g$ у нормальной машины постоянного тока.



Фиг. 335. Коммутация тока в однофазном преобразователе.

Для одинаковых α_k , i_g и $\cos \psi = 1$ на фиг. 335 представлено изменение тока при коммутации в однофазном преобразователе, а на фиг. 336 — то же в шестифазном преобразователе, причем эти изменения даны для проводника в середине фазы ($\epsilon = 0$) и для проводника в конце фазы ($\epsilon = \pm \frac{\pi}{m}$).



Фиг. 336. Коммутация тока в шестифазном преобразователе.

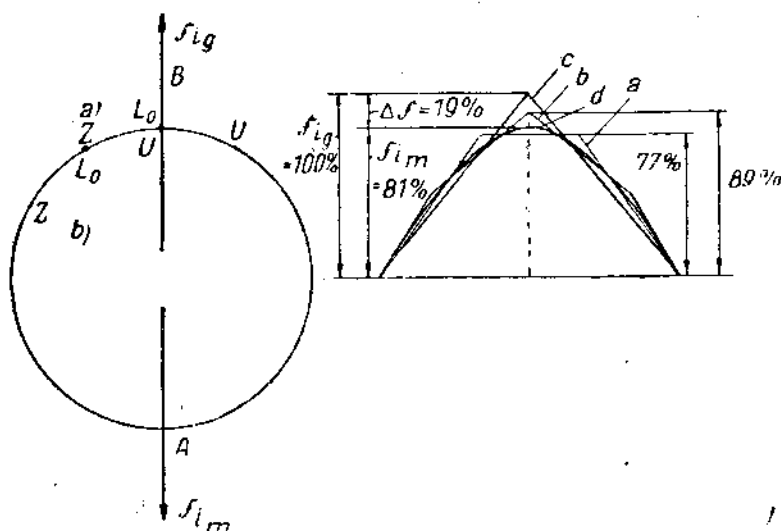
Относительно большее влияние на коммутацию оказывает магнитодвижущая сила, вызванная переменным током в коммутационной зоне и противодействующая магнитодвижущей силе, вызванной постоянным током, что способствует улучшению коммутации. Магнитодвижущая сила постоянного тока сохраняет свою величину, тогда как магнитодвижущая сила переменного тока меняет в продолжение одного периода положение фазы и силу тока. На фиг. 337 представлена эта магнитодвижущая сила

переменного тока для двух положений фаз шестифазного преобразователя без потерь, работающего с $\cos \psi = 1$. Одно положение *a* дано для момента, когда середина фазы L_0 находится в коммутационной зоне, другое положение *b* дано для момента, когда в этой зоне находится конец фазы U . В том же масштабе представлена магнитодвижущая сила постоянного

тока (c), величина которой в коммутационной зоне обозначена через F_{ig} . При этом берется за основу отношение амплитуды переменного тока к постоянному току, а именно

$$\frac{i_m \sqrt{2}}{i_g} = \frac{4}{m} \cdot \frac{1}{\sin \frac{\pi}{m}} = 1,33.$$

Как это видно, магнитодвижущая сила переменного тока колеблется в коммутационной зоне между 77 и 89% от магнитодвижущей силы постоянного тока. В качестве средней основной волны мы будем иметь приблизительно кривую d с амплитудой $F_{im} = 0,81 F_{ig}$. Это значение действительно приближенно и для остальных чисел фаз, а также для сдвига фаз. Дело в том, что в направлении коммутационной зоны действует лишь слагающая магнитодвижущей силы переменного тока, вызванная активным



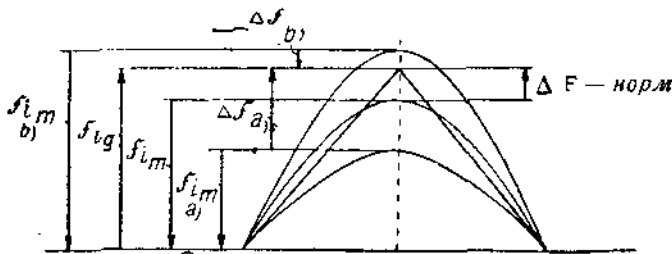
Фиг. 337. МДС в якоре одноякорного преобразователя.

током $i_m \cdot \cos \psi$ и находящаяся в неизменном отношении к магнитодвижущей силе постоянного тока, так как отношение создаваемых токов $\frac{i_m \cdot \cos \psi}{i_g}$ не зависит от сдвига фаз.

Разность магнитодвижущих сил постоянного и переменного токов дает магнитодвижущую силу, вызванную в коммутационной зоне результирующими ампер-витками. Величина этой разности колеблется между $0,23 \cdot F_{ig}$ и $0,11 F_{ig}$ и составляет в среднем $\Delta F = F_{ig} - F_{im} = 0,19 F_{ig}$. Благодаря пульсациям эта остаточная магнитодвижущая сила не может быть полностью скомпенсирована ампер-витками постоянного тока дополнительных полюсов, что отражается на коммутации. Влияние пульсаций все же значительно ослабляется большим воздушным зазором под дополнительными полюсами. Так как необходимо скомпенсировать лишь около 19% магнитодвижущей силы постоянного тока, то возбуждение дополнительных полюсов у одноякорного преобразователя слабее, чем у некомпенсированной машины постоянного тока.

При работе одноякорного преобразователя в качестве такового и с одновременной отдачей или восприятием механической мощности от

ношение токов $\frac{i_m \cos \psi}{i_g}$, а тем самым и их магнитодвижущих сил $\bar{u}_p = \frac{F_{i_m}}{F_{i_g}}$ в коммутационной зоне изменится, что вызовет изменение также и величины остаточной магнитодвижущей силы ΔF . Подобный характер работы наблюдается у одноякорного преобразователя при жестком его соединении с добавочной машиной для целей регулировки напряжения или же при его соединении с асинхронной машиной в качестве каскадного умформера. На фиг. 338 представлены получающиеся при этом магнитодвижущие силы. У преобразователя с переменного тока на постоянный остаточная магнито-



Фиг. 338. МДС в якоре при работе не чистым преобразователем.

движущая сила $\Delta F = F_{i_g} - F_{i_m}$ окажется большей (а) при восприятии механической мощности и меньшей — при отдаче механической мощности. Эта МДС может даже изменить свое направление (b) при F_{i_m} большем F_{i_g} . Средние результирующие ампер-витки, создающие остаточную магнитодвижущую силу ΔF , составляют на пару полюсов

$$\Theta_r = \Theta_a \cdot [(1 - \bar{u}_p) \dots \dots \dots (21)$$

Здесь величина

$$\Theta_a = \frac{z \cdot J_g}{2p \cdot 2a} \dots \dots \dots (22)$$

представляет собой ампер-витки постоянного тока якоря. Величина ΔF уничтожается равной ей и противоположно направленной величиной ампер-витков дополнительных полюсов Θ_r .

Кроме того, обмотка дополнительных полюсов, как и у машины постоянного тока, подсчитывается и для ампер-витков Θ_b , необходимых для уменьшения напряжения реактанса, возникающего при коммутации тока. Для коммутирующей секции обмотки якоря среднее напряжение реактанса составляет

$$e_{L_{\text{средн.}}} = \frac{J_g}{a} \cdot \frac{v_k}{b_j} \cdot (L_{N_{\text{средн.}}} + L_{S_{\text{средн.}}}) \text{ вольт} \dots \dots \dots (23)$$

Здесь v_k — окружная скорость коллектора в см/сек; b_j — путь в см, проходимый точкой окружности коллектора за период коммутации; $L_{N_{\text{средн.}}}$ — средняя индуктивность в генри, соответствующая пазовому рассеянию, $L_{S_{\text{средн.}}}$ — средняя индуктивность в генри, соответствующая лобовому рассеянию. Учитывая толщину изоляции пластин, равную j , мы получим для ширины щеток b и расстоянии между пластинами t_k по окружности коллектора

$$\bar{b}_j = b - j + \left(1 - \frac{a}{p}\right) t_k \dots \dots \dots (24)$$

Величина поля, потребного для уничтожения $e_{L_{\text{средн.}}}$, должна, следовательно, равняться

$$B_{L_{\omega}} = \frac{e_{L_{\text{средн.}}}}{s \cdot 2 \cdot i_{w_i} \cdot v_a} \cdot 10^8 \text{ гаусс} \dots \dots \dots (25)$$

В этом равенстве s — число витков в секции; l_w — расчетная длина якоря, приведенная к длине башмака дополнительного полюса; v_a — окружная скорость якоря в см/сек. Пренебрегая магнитным сопротивлением в железе, что допустимо при небольших насыщениях и большом воздушном зазоре под дополнительным полюсом, мы получим необходимое число ампер-витков

$$\Theta_k = \frac{2\delta_w}{0,4\pi} \cdot B_{L_w} \dots \dots \dots (26)$$

Таким образом, обмотку дополнительных полюсов следует рассчитать на суммарное число ампер-витков

$$\Theta_w = \Theta_r + \Theta_k \dots \dots \dots (27)$$

Предполагая, что общий поток рассеяния секции сосредоточен на расчетной длине якоря l_w , и обозначив буквой ζ' приходящееся при этом на 1 см длины среднее число индукционных линий, вызванных током в 1 амп. в секции, мы получим

$$L_{N \text{ средн.}} + L_{S \text{ средн.}} = \zeta' \cdot s^2 \cdot 2 l_w \cdot 10^{-8} \dots \dots \dots (28)$$

а из ур. (23), (25) и (28) получим

$$B_{L_w} = \frac{J_g}{a} \cdot \frac{v_k}{v_a} \cdot \frac{\zeta' \cdot s^2}{b_j}$$

Подставляя вместо $\frac{v_k}{v_a}$ отношение диаметров $\frac{d_k}{d_a}$ и, кроме того,

$$d_k = \frac{t_k \cdot z}{\pi}$$

можно написать:

$$B_{L_w} = \frac{J_g}{a} \cdot \frac{z}{2\pi \cdot d_a} \cdot \frac{t_k}{b_j} \cdot \zeta'$$

и

$$\Theta_k = \frac{2\delta_w}{0,4\pi^2} \cdot \frac{J_g}{a} \cdot \frac{z}{2d_a} \cdot \frac{t_k}{b_j} \cdot \xi = \frac{\delta_w \cdot p \cdot \zeta}{d_a} \cdot \Theta_a \dots \dots \dots (29)$$

где можно принять:

$$\frac{t_k}{b_j} \cdot \zeta' = \zeta \quad \text{и} \quad \Theta_a = \frac{z \cdot J_g}{2p \cdot 2a} \dots \dots \dots (30)$$

Таким образом, суммарные ампер-витки цепи дополнительных полюсов для пары полюсов получим из уравнения:

$$\Theta_w = \Theta_a \left(1 - \mu_F + \frac{\delta_w \cdot p \cdot \zeta}{d_a} \right) \dots \dots \dots (31)$$

Значение постоянной ζ , зависящее от пазов якоря, а также от ширины щеток и расстояний между пластинами, колеблется между 4 и 6.

§ 5. Регулирование напряжения.

Как уже доказано, переменное и постоянное напряжения нормального одноякорного преобразователя находятся между собою в определенной зависимости, лишь незначительно меняющейся с изменением нагрузки. Возбуждение здесь не может влиять как в машине постоянного тока. Дело в том, что при недовозбуждении поле, необходимое для приложенного переменного напряжения, поддерживается реактивным током, получаемым

из сети и, наоборот, при перевозбуждении — отдает реактивный ток в сеть. Изменение напряжения может быть достигнуто:

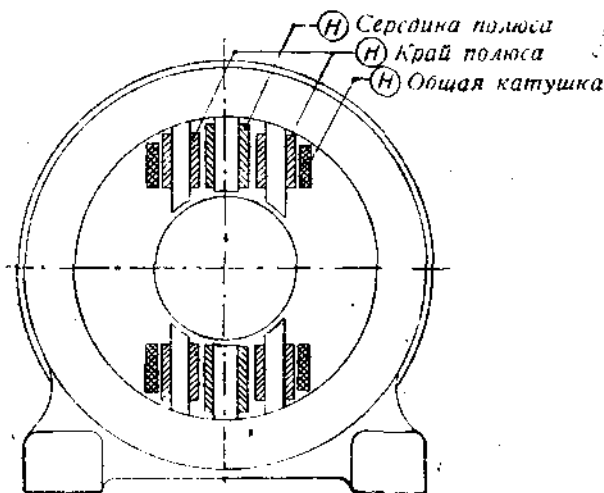
- а) изменением формы кривой поля (преобразователь с расщепленными полюсами),
- б) сдвигом щеток,
- в) изменением приложенного переменного напряжения,
- г) применением добавочных машин переменного и постоянного тока.

а) Преобразователь с расщепленными полюсами.

Из таблицы 1 мы видим, что при большом полюсном перекрытии γ , следовательно, при плоской кривой поля, отношение напряжений

$$u = \frac{E_R'}{E_g'}$$

будет меньше, а при малой величине γ , т.е. при заостренной форме кривой, это отношение больше. Таких же результатов можно достигнуть, если разделить полюса и дать отдельным частям различные возбуждения. Подобные преобразователи известны под названием преобразователей с расщепленными полюсами. Такая машина представлена на фиг. 339. Возбуждая середину полюса сильнее, чем его края, мы получим более острую кривую поля. Следовательно, при данном переменном напряжении получится меньшее постоянное напряжение. Изменив характер возбуждения, мы можем получить обратное явление.



Фиг. 339. Схема преобразователя с расщепленными полюсами.

Недостатками этого преобразователя являются как сложность конструкции и громоздкость главных полюсов, так и возникновение больших токов высокой частоты из-за искажения кривой поля, что неблагоприятно действует на коммутацию. В преобразователе с расщепленными полюсами, устроенному по Бэрнгаму (Barnham), предусмотрено деление полюса лишь на две неравные части. Коммутация при этом несколько улучшается, но все же остается хуже, чем у нормального одноякорного преобразователя. Преобразователи с расщепленными полюсами применяются поэтому редко и лишь для небольшого числа периодов.

б) Сдвиг щеток.

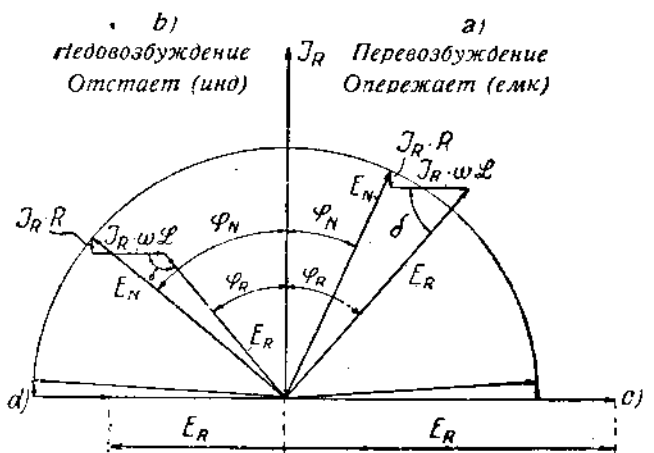
Регулировка напряжения при помощи сдвига щеток также оказывает вредное влияние на коммутацию, так как коммутационная зона при этом попадает в поле главного полюса. Кроме того, при сдвиге щеток меняется также величина магнитодвижущей силы якоря ΔF .

Полная компенсация последней в коммутационной зоне потребовала бы сильного удорожания машины, которая не смогла бы конкурировать с машинами, регулируемые методами, приведенными в пунктах *c* и *d*. Тем не менее, при достаточных размерах преобразователя для небольших мощностей и напряжений можно в известных пределах производить регулировку напряжения.

с) Дроссельная катушка, вращающийся трансформатор.

Самой распространенной является регулировка постоянного напряжения изменением напряжения, подводимого к контактным кольцам, при помощи дросселей и вращающихся трансформаторов. Если между преобразователем и трансформатором включить дроссельную катушку, то омические и индуктивные падения напряжения катушки и трансформатора будут геометрически складываться с напряжением на кольцах преобразователя. Последнее будет тем больше, чем меньше сдвиг фаз δ между ним и падением

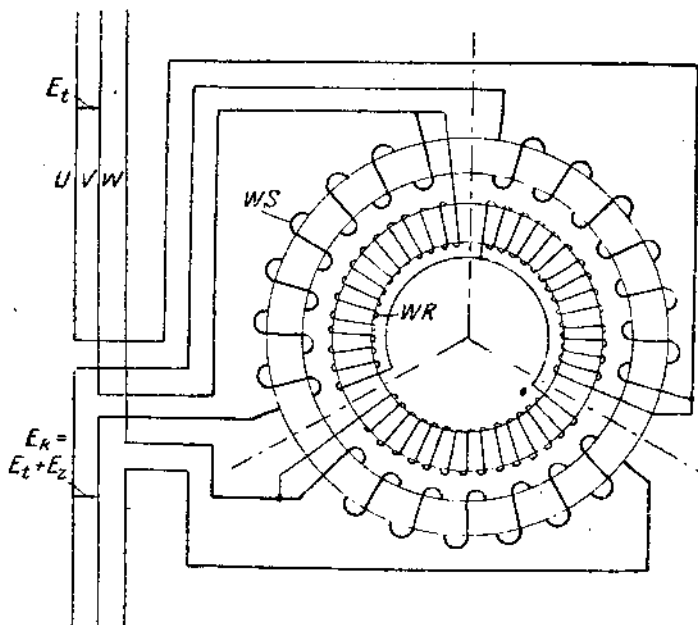
напряжения в катушке и трансформаторе (фиг. 340). Так как $\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi_R$, зависит от реактивного тока, следовательно от возбуждения преобразователя, то напряжение на кольцах можно регулировать и при помощи возбуждения. Реактивное сопротивление может в одинаковой мере находиться или между сетью и трансформатором, или же в самом трансформаторе; последний в этом случае выполняется с большим рассеянием. Из диаграммы фиг. 340 ясен характер регулировки напряжения. Все напряжения приведены к напряжению трансформатора со стороны преобразователя или выражены в процентах от нормального значения. Напряжение сети E_N , омическое падение напряжения $J_R \cdot R$ и индуктивное падение напряжения $J_R \cdot \omega \cdot L$ — все вместе дают напряжение на кольцах E_R . Здесь φ_R — коэффициент мощности, измеренный у зажимов колец, а φ_N — коэффициент мощности, полученный у зажимов сети. Вектор тока J_R взят неподвижным, а передвигаются вектора напряжений, так что конец вектора E_N перемещается по окружности. Величина E_R при перевозбуждении (*a*) возрастает, а при недовозбуждении (*b*) уменьшается. При холостом ходе преобразователя измененные напряжения из-за реактивного тока максимально, так как здесь реактивное напряжение совпадает по фазе (*c*) с напряжением сети или противоположно ему по фазе (*d*) и оба они алгебраически складываются.



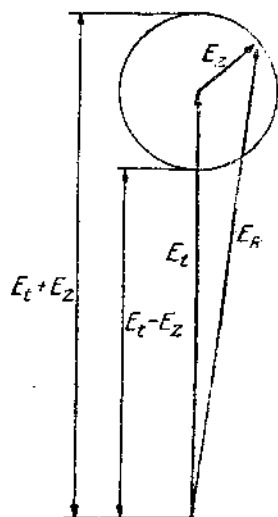
Фиг. 340. Диаграмма регулирования напряжения при помощи реактивных токов.

Чем больше реактивное сопротивление и изменение реактивного тока, тем больше предел регулировки напряжения. Практически все же не выходят из рамок $\pm 10\%$, так как, с одной стороны, большое реактивное сопротивление не желательно для способности преобразователя к перегрузке, с другой стороны, увеличение реактивного тока ведет к возрастанию потерь в якоре.

Вместо регулировки от руки при помощи шунтового регулятора напряжение может автоматически регулироваться посредством серийной обмотки на полюсах. Такое устройство может придать преобразователю желательную внешнюю характеристику (компаундирование). Об этом подробнее речь впереди.



Фиг. 341. Схема вращающегося трансформатора.



Фиг. 342. Диаграмма регулирования напряжения при помощи вращающегося трансформатора.

Как видно из фиг. 340, коэффициент мощности $\cos \varphi$ у зажимов сети меньше коэффициента мощности на кольцах преобразователя. Так как сети переменного тока большей частью находятся под индуктивной нагрузкой, то реактивное сопротивление сильно ухудшает коэффициент мощности сети.

Для регулировки напряжения в больших пределах, или в случае, если независимо от нагрузки и от напряжения требуется благоприятный коэффициент мощности сети, применяют вращающийся трансформатор. Последний аналогичен по своей конструкции асинхронному двигателю (фиг. 341). Ротор этого трансформатора с обмоткой WR может поворачиваться на ± 180 электрических градусов и присоединяется гибкими кабелями к зажимам регулируемого напряжения, расходуя при этом незначительный намагничивающий ток. Возникающее таким образом поле создает добавочное напряжение в обмотке статора WS , соединенной последовательно с преобразователем. Геометрическая сумма регулируемого напряжения E_t и добавочного напряжения E_z дает напряжение на кольцах E_R . Угол между E_t и E_z зависит от положения ротора относительно статора

и из фиг. 342 мы видим, что напряжение на кольцах E_R может быть регулировано в пределах от $E_t + E_s$ до $E_t - E_s$. Вращающийся трансформатор приводится в действие или от руки, или при помощи моторного привода. Посредством реле можно регулировку сделать и автоматической.

д) Вольто-добавочная машина.

Наконец напряжение может быть регулируемо со стороны переменного или постоянного тока при помощи добавочной машины, работающей на одном валу с преобразователем и якорная обмотка которой соединена последовательно с обмоткой последнего. В зависимости от возбуждения в обмотке этой машины возникает ЭДС, складывающаяся алгебраически с наличным напряжением, имеющим то же или противоположное направление, чем и достигается желательная регулировка напряжения. Так как добавочная машина иногда работает генератором от преобразователя в качестве вольто-добавочной машины, а иногда воздействует на преобразователь в качестве двигателя, работа вольто-противо-добавочной машиной, то отношение токов в якоре преобразователя будет меняться, а тем самым будет изменяться и величина магнитодвижущей силы якоря ΔF в коммутационной зоне (сравн. фиг. 338). Для получения регулировки напряжения в больших пределах размеры преобразователя, в целях лучшей коммутации, должны быть взяты большими, или же устраивается добавочная обмотка дополнительных полюсов, возбуждаемая постоянным током, пропорциональным добавочному напряжению.

§ 6. Реактивный ток и его зависимость от возбуждения.

При рассмотрении вопроса о регулировке напряжения было уже упомянуто, что реактивный ток одноякорного преобразователя поддается регулировке при помощи возбуждения. Как всякий синхронный двигатель улучшению коэффициента мощности сети может, следовательно, содействовать и перевозбужденный одноякорный преобразователь. Учитывая потери в якоре, такая отдача реактивной мощности окажется возможной лишь при уменьшенной мощности или при холостом ходе. При тех же потерях в меди якоря, что и при полной нагрузке, реактивный ток, допускаемый при холостом ходе, для трехфазного преобразователя будет составлять около 70% от переменного тока при полной нагрузке и при $\cos \varphi = 1$, а для шестифазного — около 55% от того же тока при тех же условиях.

Между возбуждением и реактивным током существует соотношение:

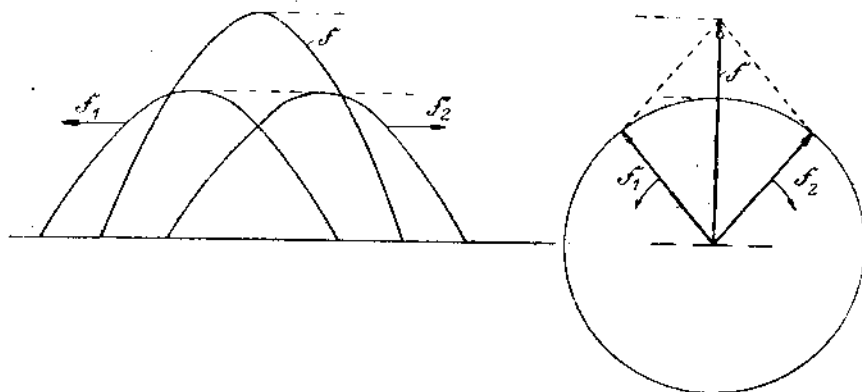
$$\Theta_J = k_0 \cdot f_w \cdot \frac{z}{2 \cdot p \cdot a} \cdot J_m \cdot \sin \psi \dots \dots \dots (32)$$

(см. главу синхронная машина). При полюсном перекрытии $\gamma = 0,65 \div 0,7$ мы имеем $k_0 \cong 0,75 \div 0,76$, а для равномерно распределенной обмотки действительно отношение:

$$f_w = \frac{\sin \frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}}$$

Увеличению числа ампер-витков на Θ_I для каждой пары полюсов соответствует таким образом опережение переменного тока относительно напряжения на $\angle \psi$ и, наоборот, уменьшение ампер-витков на Θ_I влечет а собой отставание тока на $\angle \psi$.

Переменный ток, проходя по якору многофазного преобразователя, создает в нем магнитодвижущую силу почти постоянной величины, меняющую свое направление относительно якора с синхронной угловой скоростью. В якоре же однофазного преобразователя переменный ток создает переменную магнитодвижущую силу, сохраняющую свое направление относительно якора. Можно считать, что эта переменная магнитодвижущая сила получается от наложения двух вращающихся в разные стороны магнитодвижущих сил F_1 и F_2 с половинными амплитудами (см. фиг. 343). При синхронном вращении преобразователя одна из них находится неподвижно в пространстве, тогда как другая вращается с двойной угловой скоростью, что ухудшает коммутацию и отдачу (или получение) постоянного тока. Поле вращающихся магнитодвижущих сил может быть в известной мере ослаблено демпфирующими обмотками. При безиндукционной



Фиг. 343. Разложение МДС якора однофазного преобразователя на две МДС, двигающиеся в противоположные стороны.

нагрузке направление неподвижной магнитодвижущей силы совпадает с коммутационной зоной; при сдвиге фаз действует слагающая, соответствующая реактивному току $I_m \cdot \sin \varphi$, в направлении главного потока. Таким образом, влияние реактивного тока на возбуждение при однофазном унформере в два раза слабее, чем при многофазном.

На практике можно приближенно принять величины I_R и φ , измеряемые на контактных кольцах и подсчитываемые по уравнению

$$\Theta_I = k \cdot \frac{z}{2 \cdot p \cdot a} \cdot I_R \cdot \sin \varphi. \quad (33)$$

Для k следует принять следующие величины в зависимости от числа контактных колец m :

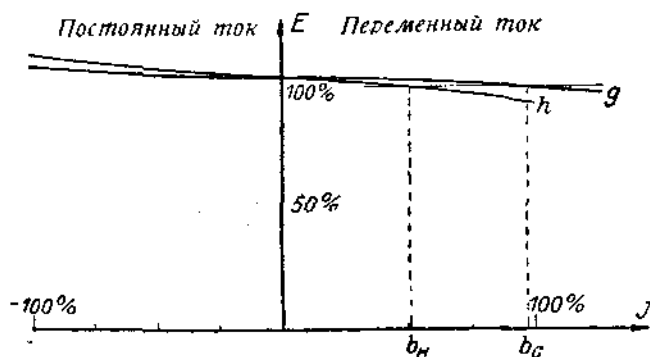
m	2	3	4	6	12
k	0,24	0,36	0,48	0,72	1,44

§ 7. Параллельная работа.

Громадное значение для параллельной работы электрических источников энергии имеют их внешние характеристики, т.е. автоматическое изменение напряжения в зависимости от нагрузки. При этом желательны характеристики, не требующие дополнительной регулировки от руки.

Распределение нагрузки, одинаковое в процентном отношении к мощности отдельных источников тока, возможно без специального ухода лишь при соответствующих друг другу внешних характеристиках. То же действительно и для толчков нагрузки, при которых невозможно производить регулировку от руки с необходимой быстротой. Так как и для преобразователей ставится вопрос об условиях их параллельной работы, то мы остановимся подробнее на рассмотрении их внешних характеристик.

У преобразователей с самовозбуждением напряжение падает с увеличением нагрузки сильнее, чем у преобразователей с посторонним возбуждением. Дело в том, что при падении напряжения возбуждение ослабляется и это, в свою очередь, из-за наличия реактивного сопротивления в цепи переменного тока, вызывает дальнейшее уменьшение напряжения. Чем больше это реактивное сопротивление (дрессельная катушка, расцен-

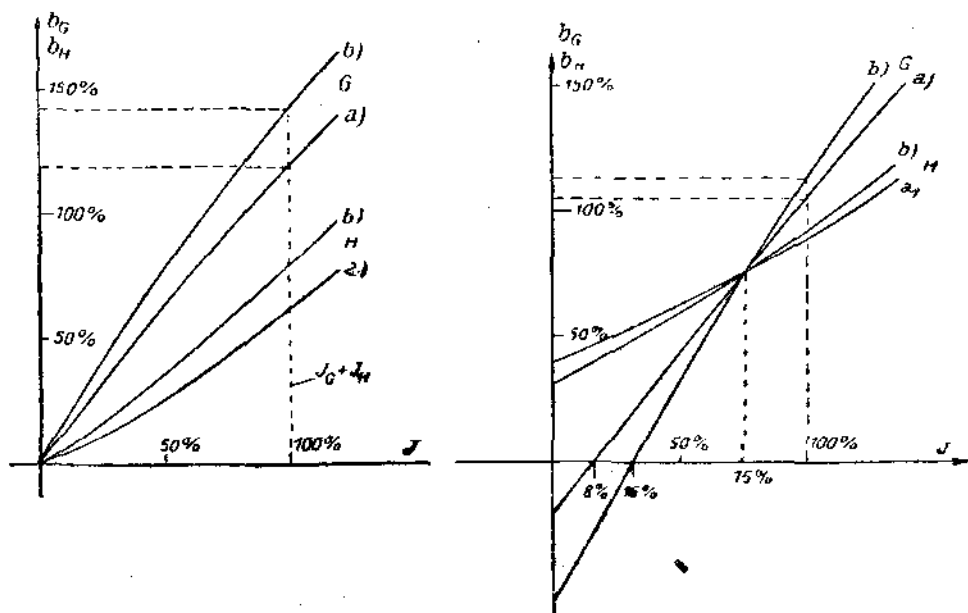


Фиг. 344. Внешние характеристики двух преобразователей.

вающий трансформатор), тем сильнее падение напряжения. При помощи противокомпаундирующей обмотки это падение может быть еще больше увеличено; при наличии же компаундирующей обмотки можно не только компенсировать это падение, но даже достигнуть возрастания напряжения (перекомпаундирования).

На фиг. 344 представлены внешние характеристики g и h двух преобразователей G и H , у которых нормальные силы тока равны I_G и I_H . Напряжение со стороны переменного тока взято постоянным. При холостом ходе эти преобразователи могут быть установлены на одинаковые напряжения постоянного тока. Если обе машины дают суммарный ток I , то отдельные токи составляют $b_G \cdot I_G$ и $b_H \cdot I_H$. Каждая прямая, параллельная оси абсцисс, соответствует какому-либо суммарному току $I = b_G \cdot I_G + b_H \cdot I_H$ и пересекает характеристики g и h в двух точках, расстояния которых b_G и b_H от оси ординат представляют степень нагрузки преобразователя. На фиг. 345 величины b_G и b_H нанесены в функции от I , при чем даны кривые: а) для случая, когда нормальная мощность у G в два раза больше, чем у H ($\frac{I_G}{I_H} = 2$), и кривые б) для $\frac{I_G}{I_H} = \frac{1}{2}$. Преобразователь с меньшим падением напряжения (G) нагружается сильнее; его нагрузка, выраженная в процентах, будет тем больше, чем меньше его нормальная мощность в сравнении с мощностью другого преобразователя. Так, например, в данном случае при нормальном суммарном токе $I = I_G + I_H = 100\%$ для преобразователя G в случае а мы получим перегрузку приблизительно в 18%, а в случае б — перегрузку в 42%, тогда как H нагружен лишь на 64 или 79%.

С целью избежания перегрузок устанавливаем приблизительно при $\frac{3}{4}$ нагрузки ($I=75\%$) одинаковые процентные выражения нагрузок для обоих преобразователей. В этом случае мы получим соотношения, представленные на фиг. 346. Преобразователь G при нормальном суммарном токе перегружается лишь на 5 или 13%. Если же суммарный ток падает до величины меньшей, чем 16% или 8% от нормального, то преобразователь G , имеющий меньшее падение напряжения, не будет больше принимать участие в нагрузке, а будет отдавать ток обратно в сеть переменного тока. При больших обратных токах действует реле обратной мощности, выключающее преобразователь. Об этом защитном приспособлении — речь впереди. При внезапном повторном возникновении нагрузки преобразователь H работал бы один и при известных обстоятельствах перегружался бы.



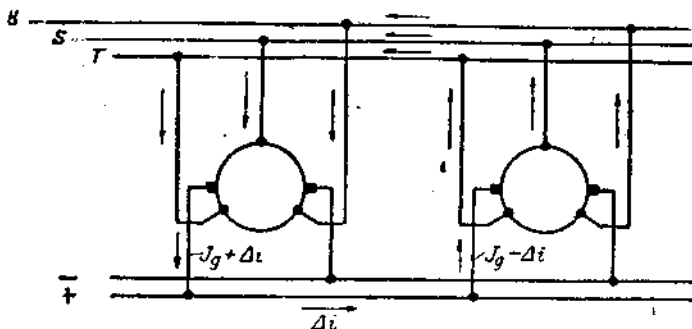
Фиг. 345 и 346. Распределение нагрузки между двумя параллельно работающими преобразователями.

Приводимые рассуждения действительны также и для параллельной работы преобразователей с генераторами. Если при такой параллельной работе переменное напряжение сильно падает из-за короткого замыкания в сети переменного тока, то преобразователь начнет работать на это короткое замыкание. Соотношения токов и магнитных полей в якоре изменяются, коммутация нарушается и возникает сильное искрение под щетками и даже круговой огонь от щетки к щетке. От этой опасности преобразователь защищается вышеупомянутым реле обратной мощности, вызывающим выключение как со стороны постоянного, так и со стороны переменного тока.

Еще одна опасность таится в подобных коротких замыканиях. Преобразователь отдает при этом в сеть большие реактивные токи. Кроме того, если преобразователь до этого работал при недовозбуждении, то его поле оказывается сильно ослабленным, и уже в качестве двигателя постоянного тока он приобретает недопустимо большое число оборотов. От последнего преобразователь защищен центробежным выключателем,

аппаратом, выключающим преобразователь с обеих сторон при увеличении числа оборотов до недопустимых значений.

При параллельной работе преобразователей со стороны постоянного тока необходимо следить за тем, чтобы со стороны колец они были связаны друг с другом лишь индуктивно, т.е. через трансформаторы. В противном случае через шины постоянного тока, преобразователь,



Фиг. 347. Параллельная работа, при которой могут возникнуть уравнивающие токи.

шины переменного тока, преобразователь (фиг. 347) потечет уравнивающий ток Δi , что поведет в отдельных преобразователях к увеличению силы тока в щетках одной полярности в сравнении со щетками другой полярности.

Как и всякая синхронная машина одноякорный преобразователь также склонен к явлениям качания. От последних машина защищена короткозамкнутой обмоткой, так называемой демпферной обмоткой, устроенной в полюсных башмаках.

§ 8. Пуск в ход.

Одноякорный преобразователь пускается в ход:

1. Как двигатель постоянного тока со стороны постоянного тока.
2. Как асинхронный двигатель со стороны переменного тока.
3. При помощи особого пускового двигателя.

При методах пуска 1 и 3 преобразователь необходимо синхронизировать, иначе говоря, в момент включения в сеть переменного тока как в последней, так и в преобразователе должны совпадать частота, напряжения и фазы. При пуске со стороны постоянного тока синхронную частоту можно установить при помощи регулировки поля. Для пуска со стороны переменного тока при помощи пускового двигателя целесообразно соединить преобразователь выдвижной муфтой с асинхронным двигателем, имеющим небольшое число полюсов. Скольжение двигателя выбирается или у двигателя с регулировкой сопротивлений цепи ротора устанавливается так, чтобы было достигнуто синхронное число оборотов преобразователя. После параллельного включения преобразователя со стороны переменного тока пусковой двигатель выключается и механически отделяется от преобразователя.

Наиболее распространенным методом пуска является метод 2, при котором в преобразователе быстро и автоматически устанавливается синхронное состояние. Демпферная обмотка, устроенная для уничтожения явления качания, действует здесь, как беличье колесо асинхронного двигателя. В этой обмотке индуцируется ЭДС, а тем самым возникает и ток

короткого замыкания, создающий вместе с вращающим полем некоторый момент вращения. Вращающее поле, возникшее в якоре от приложенного напряжения, индуктирует в витках (большей частью один виток), находящихся между двумя соседними коллекторными пластинами, противо-ЭДС синхронной частоты. Эта ЭДС пропорциональна изменению во времени магнитному потоку, пронизывающему витки, или, иначе говоря, числу индукционных линий, пересекающих в единицу времени проводники этих витков. В витках, коротко-замкнутых щетками постоянного тока, она, следовательно, пропорциональна мгновенным значениям индукций в коммутационной зоне. Токи, возникающие в коротко-замкнутых витках, прерываются при вращении коллектора, что вызывает сильный огонь под щетками в момент прохождения максимальной величины вращающего поля через коммутационную зону. Частота этого огня уменьшается по мере возрастания числа оборотов преобразователя соответственно уменьшению скорости вращения поля в пространстве, длительность же его, наоборот, увеличивается.

Пусть n — число оборотов преобразователя в данный момент, n_s — синхронное число оборотов, тогда число оборотов вращающегося поля в пространстве будет равно $n_p = n_s - n$.

Для уменьшения искрения при пуске, а также и в значительной мере безваттного пускового тока выбирают напряжение для пуска настолько малым, насколько это допускается условием удовлетворительного пуска. На полное же напряжение переключают лишь после того, как преобразователь достиг синхронизма. При пусковом напряжении в 30% и пусковом токе около 150% от нормального получается при пуске кажущаяся мощность в 45% от нормальной. Пускового огня можно совершенно избежать, если во время пуска поднять щетки над коллектором. К этой мере часто прибегают в Америке.

Преобразователь, пускаемый в ход с самовозбуждением, возбуждается лишь перед самым попаданием в синхронизм, при чем получает заранее неопределимую полярность. Если у преобразователя оказалась неправильная полярность, то перед включением на полное напряжение меняют направление возбуждения. Преобразователь начинает медленно скользить, что становится заметным по падающему напряжению постоянного тока. В момент, когда последнее достигнет нулевого значения, т.е. при скольжении в 90 электрических градусов, мы будем иметь начало автоматической повторной перемены направления возбуждения машины. Для избежания этого шунтовая обмотка должна быть снова переключена на-крест, т.е. переключена в первоначальное положение. Преобразователь продолжает скользить на 90 электрических градусов, т.е. при другой, правильной полярности.

Перемену полюсов можно достигнуть и кратковременным размыканием пускового выключателя или выключателя высокого напряжения при пусковом напряжении, чем также достигается скольжение преобразователя. Посторонним возбуждением при пуске можно заранее вызвать правильную полярность у преобразователя.

При пуске в шунтовой обмотке индуктируется переменное напряжение, могущее достигнуть опасных размеров при разрыве цепи возбуждения. Для избежания пробоя изоляции между отдельными витками или между последними и железом полюсов обмотка замыкается через сопротивление. Согласно нормам 1923 г. (REM), цепь возбуждения считается коротко-замкнутой, если ее сопротивление не больше 10-кратного сопротивления шунтовой обмотки.

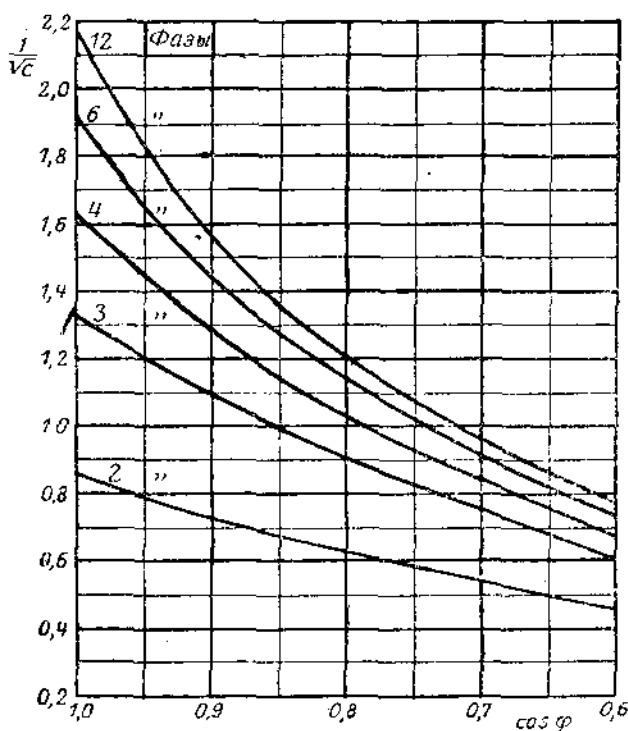
§ 9. Расчет и схема соединения.

Расчет одноякорного преобразователя аналогичен расчету машины постоянного тока, а потому укажем лишь вкратце разницу между ними.

Прежде всего следует отметить, что из соображений симметрии число проводов z якоря должно делиться на 2 *а. т.* (фиг. 328). Для джоулевых потерь в якоре мы имеем $V_a = c \cdot R_a \cdot J_g^2$. Таким образом, поперечное сечение провода следует рассчитывать только на эффективный ток.

$$J_g' = \frac{J_g}{\frac{1}{\sqrt{c}}}.$$

Отсюда следует, что одноякорный преобразователь может отдавать мощность, равную $\frac{1}{\sqrt{c}}$ -кратной мощности такой же машины постоянного



Фиг. 348. Кривые $\frac{1}{\sqrt{c}}$ для определения эффективного тока.

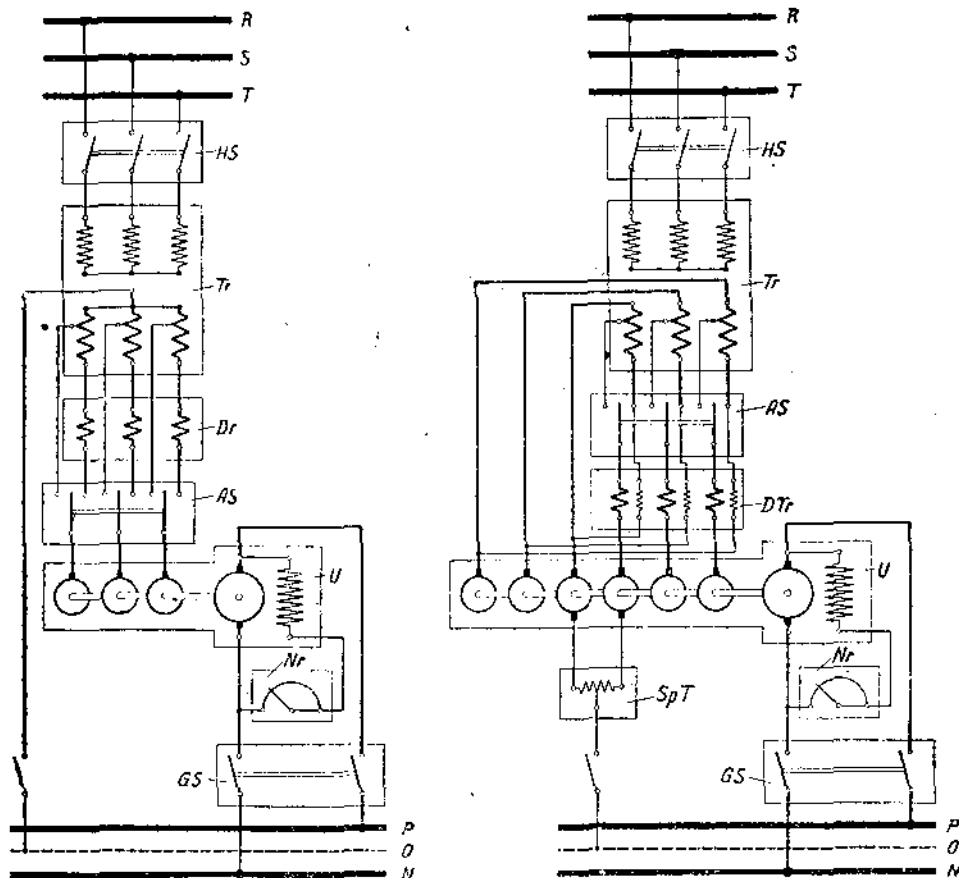
тока. Из кривых на фиг. 348 можно получить величину $\frac{1}{\sqrt{c}}$ для различного числа колец в зависимости от $\cos \varphi$ ($\cos \psi$).

Ампер-витки дополнительных полюсов $\Theta_w = \Theta_a (1 - a_p) + \Theta_k$ (см. ур. 27) меньше на $a_p \cdot \Theta_a$, ампер-витков некомпенсированной машины постоянного тока. Часть этой экономии в меди все же пропадает, так как из-за больших размеров воздушного зазора под дополнительным полюсом, сделанного для улучшения коммутации, величина Θ_k становится большей, чем у машины постоянного тока. Учитывая пульсации магнитодвижущей силы якоря а также и неправильность коммутации тока во всех витках одной фазы (ср. фиг. 335

и 336), одноякорные преобразователи рассчитываются на меньшее напряжение коммутации $e_{L_{\text{среди}}}$.

Ампер-витки главных полюсов состояются из следующих частей.

1. Из величины Θ_E , необходимой для создания поля $\Phi = \frac{E_g' \cdot a \cdot 30}{n \cdot p \cdot z} \cdot 10^8$, дающего ЭДС $E_g' = E_g \pm [R_a \cdot \sqrt{c} \cdot J_g + (R_w + R_h) \cdot J_g + V]$ (см. расчет машины постоянного тока). Величины R_w и R_h — сопротивления обмоток дополнительных и главных полюсов, V — падение напряжения под щетками постоянного тока, знак $+$ берется при отдаче постоянного тока, а знак $-$ при потреблении постоянного тока

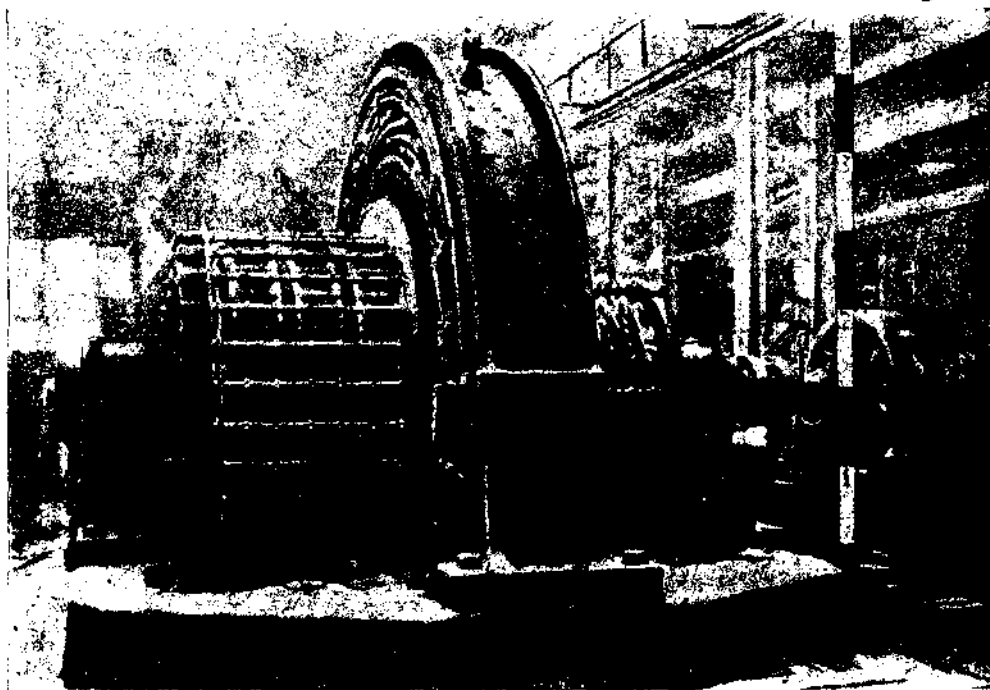


Фиг. 349 и 350. Схема трехфазного и шестифазного одноякорного преобразователя.

2. Из величины $\pm \Theta_j$, соответствующей реактивному току. Эта величина при опережающем токе положительна, а при отстающем — отрицательна. Отношение между этими ампер-витками и реактивным током представлены в ур. (33).

Добавочные ампер-витки, необходимые в машине постоянного тока для борьбы с искажением поля, возникающим благодаря магнитодвижущей силе якоря, в одноякорном преобразователе чрезвычайно незначительны, так как магнитодвижущая сила якоря почти целиком уничтожается переменным током.

На фиг. 349 и 350 представлены схемы соединений трехфазного и шестифазного преобразователя. Выключатель HS соединяет трансформатор Tr с сетью переменного тока RST . Пусковой выключатель AS приводится в пусковое положение перед самым пуском (на фигуре — в левую сторону), после чего включается HS . После установления синхронизма и правильной полярности AS переключается на полное напряжение (вправо). Между трансформатором и контактными кольцами устанавливается или дроссельная катушка Dr или вращающийся трансформатор DTr . Как мы видим, шунтовой регулятор Nr не выключается из-за наличия высокого переменного напряжения в обмотке возбуждения при пуске. Выключателем



Фиг. 351. Одноякорный преобразователь (фирмы Сименс-Шуккерт) 520 вольт, 5 000 kW.

постоянного тока GS преобразователь присоединяется к сети постоянного тока PV . Для трехпроводной системы при трехфазном преобразователе нулевой провод сети присоединяется к нулевой точке вторичной обмотки трансформатора, а при шестифазном преобразователе нулевой провод присоединяется к середине обмотки дроссельной катушки (делителя напряжения $SprT$), концы которой приключены к „диаметральному напряжению“ двух колец.

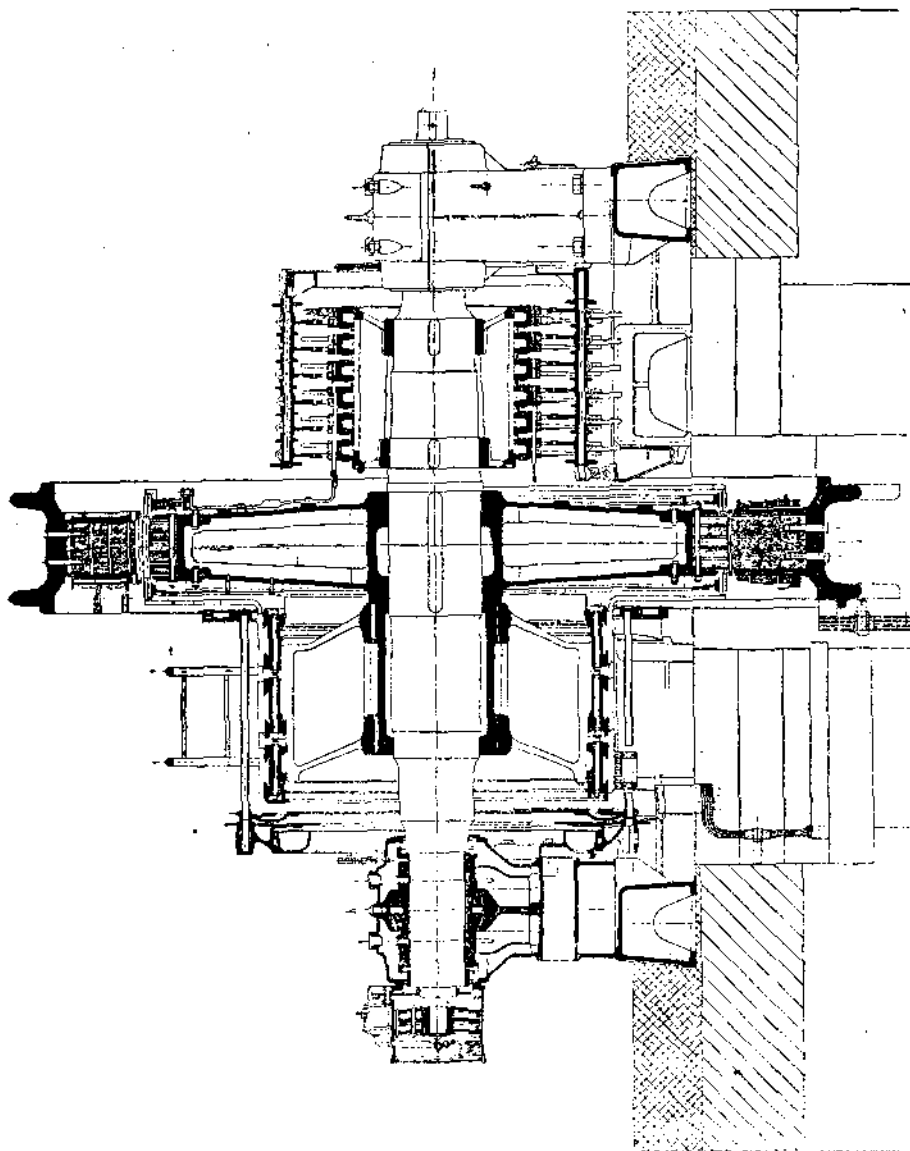
На фиг. 351 представлен одноякорный преобразователь для 520 вольт и 5 000 kW, построенный фирмой SSW (Siemens-Schuckert Werke), а на фиг. 352 дан его разрез.

§ 10. Применение.

1. Обычно одноякорный преобразователь применяется для преобразования переменного тока в постоянный.
2. В качестве „обратного преобразователя“ он применяется также для преобразования постоянного тока в переменный.

3. В обоих случаях преобразователь может, кроме того, воспринимать или отдавать механическую мощность, что, однако, ухудшает его коммутацию (фиг. 338).

4. При механическом приводе одноякорный преобразователь работает в качестве генератора двойного тока и дает постоянный ток и переменный,



Фиг. 352. Разрез одноякорного преобразователя, представленного на фиг. 516.

При этом токи в якоре одинаково направлены и складываются друг с другом так же, как и обе магнитодвижущие силы якоря.

5. Кроме того, преобразователь может работать в качестве двигателя двойного тока. При этом действительны соображения, приведенные в п. 4.

6. Наконец, одноякорный преобразователь находит применение и для преобразования числа фаз. Для этой цели от обмотки его якоря устраиваются ответвления на различное число фаз и соединяются с соответствующими контактными кольцами.

а) Нормальная работа.

Преобразователь переменного-постоянного тока служит в большинстве случаев для питания коммунальных сетей постоянного тока от собственных или районных передач переменного тока. Для работы преобразователя поочередно то на световую сеть, то на железнодорожную с высоким напряжением, устанавливают или трансформатор с переключением, или же вращающийся трансформатор с регулировкой напряжения в широких пределах. В промышленности одноякорный преобразователь находит свое применение там, где постоянный ток безусловно необходим (химические ванны), или оказывается более пригодным для питания простых и легко регулируемых двигателей постоянного тока (прокатное дело и т. д.).

б) Схема для регулирования числа оборотов асинхронного двигателя с двигателем постоянного тока.

Одноякорный преобразователь применяется также и для регулировки без потерь асинхронных двигателей. Известно, что число оборотов асинхронного двигателя можно установить путем изменения сопротивления обмотки ротора. Для этой цели последняя присоединяется через контактные кольца к регулируемым сопротивлениям, находящимся вне машины. Чем больше число оборотов ротора отстает от синхронного, тем больше становится индуктированное в его обмотках напряжение и тем больше (даже и при токе ротора, потребном для создания момента вращения) мощность, расходуемая в роторе и сопротивлениях. Пусть n_s — синхронное число оборотов двигателя, n — действительное число оборотов, тогда скольжение выразится:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \dots \dots \dots (36)$$

Пренебрегая потерями в статоре, мы имеем электрическую мощность, переданную ротору:

$$N_r = s \cdot N, \dots \dots \dots (37)$$

где N означает полученную мощность.

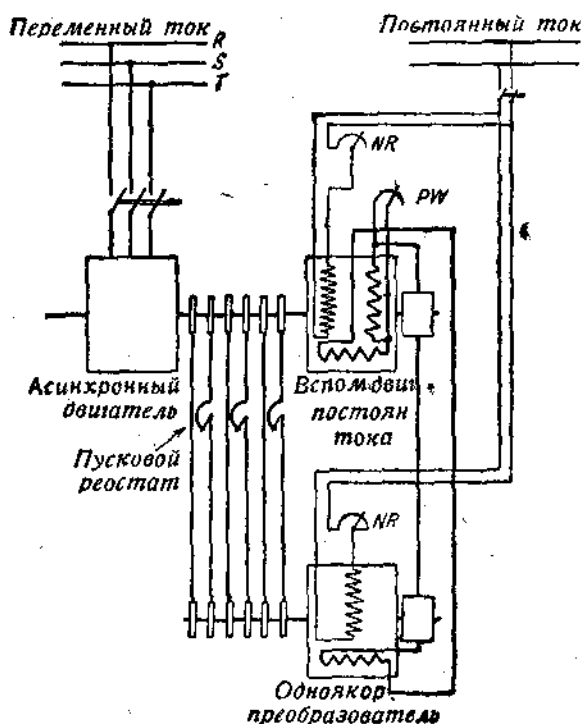
Механическая же мощность, служащая для привода, составляет $N - N_r = N \cdot (1 - s)$. При регулировке без потерь мощность N_r преобразуется в одноякорном преобразователе и подводится к двигателю постоянного тока, который в свою очередь передает эту мощность, преобразованную в механическую, на вал двигателя трехфазного тока. На фиг. 353 представлено соединение такого агрегата.

У преобразователя обычно предусмотрена более мощная обмотка полюсов. В качестве перевозбужденного синхронного двигателя он дает намагничивающий ток для асинхронного двигателя, так что коэффициент мощности последнего повышается до единицы и может даже оказаться емкостным. Преобразователь и двигатель постоянного тока, именуемый также вспомогательным двигателем, имеют постороннее возбуждение. Изменением возбуждения двигателя можно регулировать рабочее число оборотов. Число оборотов преобразователя, а также и постоянное напряжение E_d для идеального холостого хода (когда все токи равны нулю), пропорциональны скольжению s . При нагрузке величина E_d все же отклоняется от этой пропорциональности благодаря отдельным падениям напряжения; в этом случае величину постоянного напряжения можно определить из векторной диаграммы, изображенной на фиг. 354.

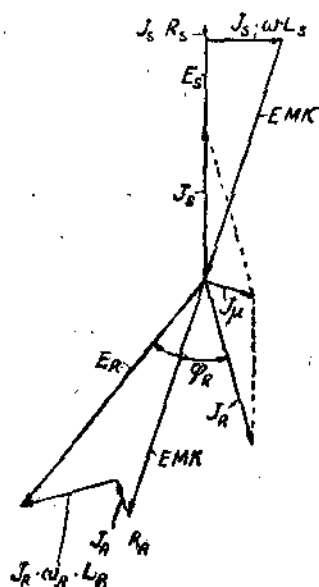
И в данном случае рекомендуется, как обычно, принимать одинаковые длины векторов ЭДС в роторе и статоре. Отношение ЭДС фазы ротора

к ЭДС фазы статора при скольжении s составляет $u_s = s \cdot \frac{E_{r0}}{E_s}$. Отношение фазовых напряжений при идеальном холостом ходе двигателя и его неподвижном состоянии $u_{s0} = \frac{E_{r0}}{E_s}$ равно отношению числа витков фазы ротора к числу витков фазы статора (см. главу: Асинхронная машина). Пересчитав все векторы по отношению к ротору, мы должны будем умножить все напряжения статора на u_s . Отношение тока в фазе ротора J_R к току в фазе статора J_s также строго определяется обмотками и равно $\frac{J_R}{J_s} = \frac{1}{u_{s0}}$.

Таким образом токи статора следует делить на u_{s0} .



Фиг. 353. Схема регулировочного агрегата постоянного тока.



Фиг. 354. Диаграмма напряжений регулировочного агрегата постоянного тока.

На диаграмме наносят напряжение статора E_s и ток статора J_s с углом сдвига фаз между ними, равным φ_s (в нашем случае $\varphi_s = 0$), к вектору E_s пристраивают омическое и индуктивное падения напряжения статора и получают таким образом ЭДС. Перпендикулярно к последней расположен намагничивающий ток J_μ . Ток ротора J_R равен по величине и направлению разности векторов $J_s - J_\mu$. ЭДС, омическое и индуктивное падения напряжения в роторе складываются геометрически с напряжением между кольцами E_R преобразователя. Отсюда легко определить постоянное напряжение E_p из равенства $E_p = \frac{E_R}{u}$.

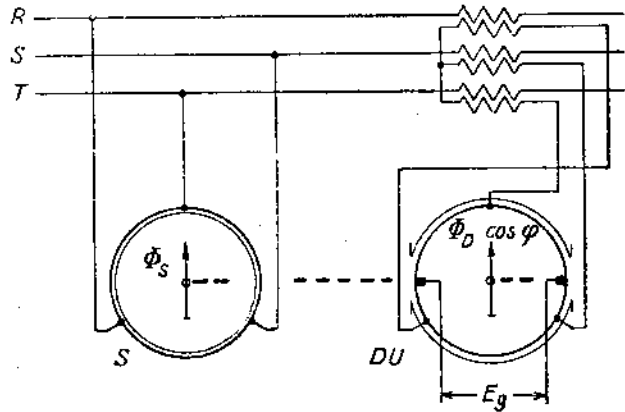
Не трудно убедиться, что возрастание напряжения E_p при разгрузке в процентном отношении будет тем больше, чем меньше скольжение и, следовательно, чем больше число оборотов двигателя. Таким образом, при неизменном положении регулировки преобразователя и вспомогательного

двигателя, получается возрастание числа оборотов; это возрастание при малом числе оборотов меньше, чем при большом. Для того, чтобы при всяком числе оборотов иметь возможность устанавливать возрастание числа оборотов на какую-либо определенную в процентном отношении величину, параллельно к компаундной обмотке вспомогательного двигателя присоединяют регулировочное сопротивление (на фиг. 353 обозначено через PW).

Для ограничения силы тока при пуске регулировочного агрегата между трехфазным двигателем и кольцами преобразователя включается пусковое сопротивление. Преобразователь получает энергию как от ротора, так и возбужденного промежуточного двигателя, работающего как генератор, и приводится в движение одновременно как асинхронный трехфазный двигатель и как двигатель постоянного тока. Преобразователь достигает синхронизма в тот момент, когда его возрастающее число периодов совпадает с уменьшающимся числом периодов скольжения. При этом пусковое сопротивление замыкается накоротко. Число оборотов, при котором устанавливается синхронизм преобразователя, зависит от возбуждения вспомогательного двигателя.

с) Преобразователь с вращающимся полем.

Как на особый вид преобразователя переменного-постоянного тока следует еще указать на преобразователь с вращающимся полем Даниельсона (Danielson), у которого создается постоянное напряжение, пропорциональное трехфазному току. Он представляет собою одноякорный преобразователь с слабым насыщением и без возбуждения полюсов. Обмотка его якоря присоединена или непосредственно, или через трансформатор тока к трехфазной сети (фиг. 355). Трехфазный ток вызывает в якоре вращающееся поле Φ_D , находящееся неподвижно в пространстве благодаря синхронному вращению преобразователя DU в сторону, противоположную вращению поля. Для привода служит синхронный мотор S , питаемый той же сетью. Вращающееся поле Φ_D создает в обмотке якоря напряжение, пропорциональное этому полю, а при слабом насыщении машины, следовательно, и току. Соответственно сдвигу фазы тока относительно напряжения сети, сдвинется в пространстве на такой же электрический угол и направление поля, а тем самым и распределение потенциала на коллекторы. Направление поля Φ_s в пусковом двигателе и поля $\Phi_D \cdot \cos \varphi$, созданного в преобразователе ваттным током $I \cdot \cos \varphi$, всегда сохраняют все же друг относительно друга постоянное положение в пространстве (если при этом пренебречь небольшим сдвигом из-за индуктивного падения напряжения). В нашем примере (фиг. 355) обе машины соединены между собой муфтой так, что оба поля направлены вверх. Между коллекторными щетками, сдвинутыми на 90 электрических градусов относительно этого направления, получится, следовательно, постоянное напряжение E_p , пропорциональное $I \cdot \cos \varphi$ (фиг. 356 а).



Фиг. 355. Схема преобразователя с вращающимся полем.

При параллельной работе число периодов задается другими генераторами и реактивная мощность преобразователя может быть установлена по желанию при помощи возбуждения. Нагрузка преобразователя производится регулировкой подводимого постоянного напряжения, или же регулировкой отдаваемого переменного напряжения при помощи вращающегося трансформатора в том случае, если изменение постоянного напряжения невозможно или нежелательно.

е) Преобразователь постоянно-однофазного тока.

В качестве машины постоянно-однофазного тока преобразователь часто применяется для целей рентгентехники в том случае, если отсутствует переменное напряжение, необходимое для трансформации. На фиг. 357 представлена схема соединения такой установки. Преобразователь *EU*, питаемый от сети постоянного тока, дает переменное напряжение. Последнее повышается при помощи трансформатора высокого напряжения *HT* (до 80 kV), выпрямляется кенотронами, соединенными по схеме Грэтца (*Graetz*) *HG* и подводится к трубкам Рентгена *RR*. Регулировка напряжения производится регулировкой промежуточного трансформатора *ZT* регулятором *SR_g* (грубая) и *SR_r* (тонкая). Энергия для накала кенотронов подается трансформаторами накала *H₁T* и может быть отрегулирована при помощи сопротивлений *HR*. Так как при сильной нагрузке переменное напряжение падает, то при этом уменьшается и сила тока накала, а следовательно, и образование электронного потока в трубках Рентгена и в катодных лампах. Для компенсации этого действия в нагревательную цепь включен уравнивательный трансформатор *AT* создающий добавочное напряжение, пропорциональное току нагрузки.

С. Каскадный преобразователь.

§ 1. Общие замечания.

Каскадный преобразователь состоит из асинхронного двигателя и одноякорного преобразователя, при чем оба они соединены друг с другом как механически, так и электрически (фиг. 358). Обе машины жестко соединены муфтой, так что число оборотов n_u у них одинаково. Обмотка ротора асинхронной машины соединена с обмоткой якоря преобразователя последовательно или, как видно из самого названия, в каскад. При регулировке без потерь асинхронного двигателя мы видим, что одноякорный преобразователь, также соединенный последовательно с обмоткой ротора, вращался синхронно тогда, когда его число периодов совпадало с числом периодов скольжения ротора. Точно также обстоит дело и с каскадным преобразователем. Если асинхронная машина имеет p_a пар полюсов, которым соответствует синхронное число оборотов n_s , то число периодов ротора при n_u оборотах будет равно $f_r = \frac{p_a(n_s - n_u)}{60}$; при наличии у одноякорного преобразователя p_g пар полюсов его число периодов будет составлять

$$f_u = \frac{p_g \cdot n_u}{60}.$$

Для синхронного вращения преобразователя мы имеем $f_r = f_u$, следовательно, $p_a(n_s - n_u) = p_g \cdot n_u$, или, что то же, $p_a n_s = (p_a + p_g) \cdot n_u$. Согласно этого равенства каскадный преобразователь может рассматриваться, как синхронная машина, число пар полюсов которой равно сумме чисел пар полюсов отдельных машин. Соответственно ур. (2) для одноякорного преобразователя мы получаем для каскадного:

$$f = \frac{(p_a + p_g) n_u}{60} \dots \dots \dots (38)$$

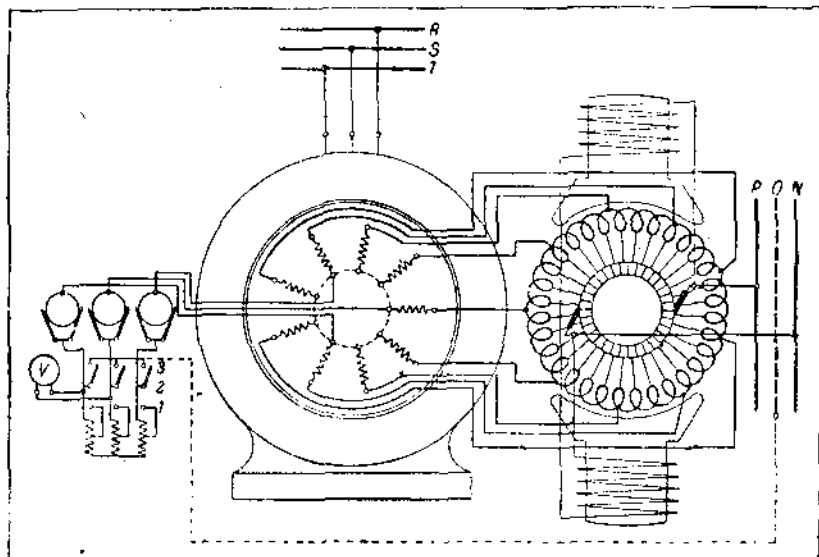
Для скольжения асинхронного мотора получается:

$$s = \frac{p_g}{p_d + p_g} \dots \dots \dots (39)$$

На фиг. 359 представлена схема соединения каскадного преобразователя. Статор асинхронной машины трехфазный, как и питающая сеть, а



Фиг. 358. Каскадный преобразователь (Сименс-Шуккерт), трехфазный ток 6 000 вольт, 50 пер/сек, постоянный ток 450 вольт, 2 500 kW.



Фиг. 359. Схема каскадного преобразователя.

ротор, в соответствии с одноякорным преобразователем, выполняется шести-, девяти-, или двенадцатифазным и присоединяется непосредственно от колец с обмоткой преобразователя. Последовательность присоединений фаз должна быть такой, чтобы поле, возникающее в якоре преобразователя, вращалось противоположно вращению якоря и при синхронизме находилось бы в пространстве неподвижно относительно полюсов.

§ 2. Соотношения между напряжениями.

Отношение переменного напряжения к постоянному неизменно также и в каскадном преобразователе. Это отношение можно менять лишь в ограниченных пределах. При переменном напряжении, не превосходящем 10 000 вольт, статор наматывается для непосредственного включения в сеть переменного тока. Трансформатор, потребный для одноякорного преобразователя, здесь отпадает или большей частью заменяется асинхронной машиной. Отношение витков статора к виткам ротора выбирается таким, чтобы переменное напряжение E_R , подводимое к одноякорному преобразователю, и желательное постоянное напряжение E_g были связаны отношением $u = \frac{E_R}{E_g}$, заданным полюсным перекрытием и числом фаз (см. табл. 1).

Реактивное сопротивление асинхронной машины при каскадном преобразователе дает возможность регулирования напряжения путем изменения возбуждения преобразователя точно так же, как дроссельная катушка и реакция рассеяния трансформатора давали эту возможность при одноякорном преобразователе. Для определения напряжений и потребных для этой цели реактивных токов служит та же диаграмма, которая была дана на фиг. 354 для регулировки без потерь асинхронных двигателей. В каскадном преобразователе ЭДС ротора и статора, благодаря неизменному скольжению, сохраняют между собой постоянное соотношение $u_a = s \cdot u_{a_0} = \frac{p_g}{p_a + p_g} \cdot \frac{E_{r_0}}{E_s}$.

Здесь E_{r_0} — напряжение ротора, E_s — напряжение статора для идеального холостого хода и неподвижного ротора ($s = 1$). Напряжения статора следует увеличить в $\frac{p_g}{p_a + p_g} \cdot \frac{E_{r_0}}{E_s}$ раз, а токи статора в $\frac{E_s}{E_{r_0}}$ раз, после чего их можно геометрически складывать с соответствующими величинами ротора. На диаграмме (фиг. 360) представлена регулировка напряжения: а) действительна для перевозбуждения, следовательно, для повышения напряжения, б) — для недо возбуждения, следовательно, для уменьшения напряжения. Напряжение сети трехфазного тока в обоих случаях взято одинаковым, а положение вектора тока в статоре — неизменным.

§ 3. Соотношения между токами.

При скольжении, равном s , одноякорный преобразователь воспринимает часть получаемой мощности N , а именно часть $N_r = s \cdot N$ электрически, а остальную часть $N - N_r = N(1 - s)$ — механически (при этом конечно пренебрегаем потерями). Это значит, что в якоре преобразователя преобладает постоянный ток и отношение переменного тока к постоянному будет здесь лишь s -кратным в сравнении с простым одноякорным преобразователем. При умножении всех переменных токов на $s = \frac{p_g}{p_a + p_g}$ все формулы, дающие соотношения между токами одноякорного преобразователя, окажутся действительными и для каскадного преобразователя.

Таким образом коэффициент c' для подсчета потерь в меди якоря:

$$V_a = c' R_a I_g^2$$

для каскадного преобразователя получит вид:

$$c' = 1 + \frac{8 \left(\frac{p_g}{p_a + p_g} \right)^2}{m^2 \sin^2 \frac{\pi}{m} \cos^2 \psi} = \frac{16 \cdot p_g}{p_a + p_g} \cdot \frac{1}{\pi^2} \dots \dots \dots (40)$$

Благодаря преобладанию постоянного тока условия коммутации при каскадном преобразователе становятся аналогичными условиям коммутации в машине постоянного тока. Постоянная магнитодвижущая сила в якоре компенсируется переменным током лишь на $\frac{P_g}{P_d + P_g} \cdot 81\%$. Дополнительным полюсам должно быть поэтому дано возбуждение большее, чем в одноякорном преобразователе. С другой стороны пульсации остаточной магнитодвижущей силы $\Delta F = F_g - F_m$ будут меньше, что дает возможность иметь меньший воздушный зазор под дополнительным полюсом.

Для учета влияния реактивного тока на возбуждение действительно, как и при одноякорном преобразователе, ур. (32). Фазовый ток определяется из ур. (7), где для N берется электрическая часть мощности, воспринятая одноякорным преобразователем, а именно:

$$N_r = \frac{P_g}{P_d + P_g} \cdot N.$$

§ 4. Пуск в ход.

Пуск преобразователя осуществляется асинхронно со стороны трехфазного тока. Как явствует из фиг. 359, одни концы фаз ротора подводятся к обмотке преобразователя, а другие — к контактам, замыкаемым во время работы особым кольцом, соединяющим обмотку в звезду. Свободные концы трех фаз, сдвинутых друг относительно друга на 120 электрических градусов, связаны с контактными кольцами, замыкаемыми при пуске накоротко через щетки и сопротивления (положение выключателя 1); таким образом создается трехфазная замкнутая цепь. Если включить каскадный преобразователь в сеть трехфазного тока, то он начнет работать как асинхронный двигатель с контактными кольцами и будет стремиться, соответственно числу пар полюсов p_d к синхронному числу оборотов n_d , большему чем число оборотов агрегата n_a . На коллекторе преобразователя возникает при этом переменное напряжение, число периодов которого уменьшается по мере увеличения числа оборотов и становится равным нулю в момент достижения каскадным преобразователем его синхронного числа оборотов n_d (соответственно $\frac{P_g}{P_d + P_g}$).

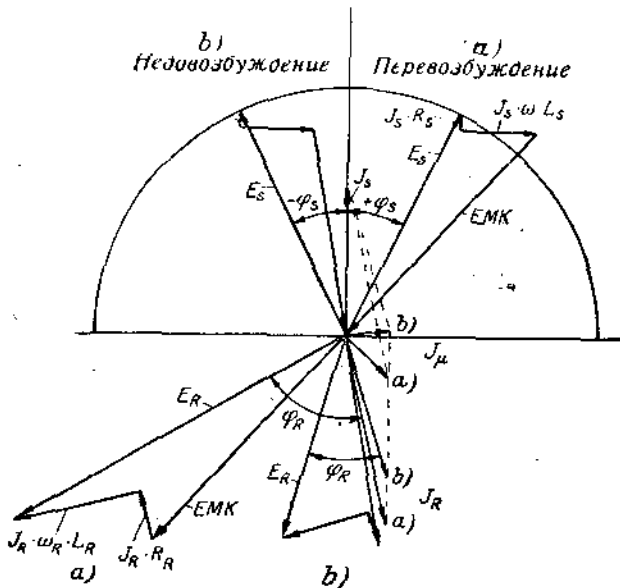
Так как заранее предполагается, что обмотка возбуждения приключена, то в действие вступает самовозбуждение каскадного преобразователя, вызывающее синхронизирующий момент вращения ротора. Благодаря такому моменту, в случае числа оборотов ротора выше синхронного n_d , последний постепенно возвращается к этому синхронному числу оборотов. Если обмотка возбуждения все же не приключена, то число оборотов возрастает почти до n_d , что при одинаковых числах пар полюсов обеих машин ($p_d = p_a$) составит двойное число оборотов. При этом были бы подвержены опасности не только обмотка возбуждения из-за индуктированного в ней высокого напряжения, но и вращающиеся части, которые находились бы при этом под действием высоких механических напряжений. Поэтому в шунтовом регуляторе не устраивают холостого контакта и в каскадном преобразователе предусматривается центробежный выключатель, отключающий машину от сети при числе оборотов выше установленного.

В схеме SSW (Сименс-Шуккерт), представленной на фиг. 359, пуск в ход перед достижением синхронного числа оборотов замедляется для того, чтобы время для создания синхронизирующего магнитного поля оказалось достаточным. Для этой цели увеличивается пусковое сопротивление (положение выключателя 2), благодаря чему уменьшается активный ток,

а тем самым, и момент вращения. Тех же результатов можно достигнуть, включив в цепь ротора дроссельную катушку¹⁾. Когда каскадный преобразователь достиг синхронизма и в нем установилась правильная полярность, то его пусковое сопротивление (положение выключателя 3) и все свободные концы фаз замыкаются накоротко (пунктирная линия). При этом щетки над кольцами приподнимаются; лишь при трехпроводной системе часть остается для соединения нулевого провода с нулевой точкой короткого замыкания. Для параллельной и обратной работ действительны те же рассуждения, что и для одноякорного преобразователя.

Д. Сравнение типов преобразователей.

Перед тем, как остановиться на преобразовательной установке, необходимо взвесить преимущества и недостатки различных типов преобразователей. С точки зрения незначительности первоначальных затрат и занимаемого в установке места, а также с точки зрения незначительности веса и высокого коэффициента полезного действия, одноякорный преобразователь стоит на первом месте, а мотор-генератор — на последнем. Если же речь идет о возможности регулировки в широких пределах вплоть до самых



Фиг. 360. Диаграмма регулировки напряжения каскадного преобразователя.

малых напряжений, о простоте схемы и способа обслуживания, а также и о большей безопасности в эксплуатации, то преимущество безусловно окажется на стороне мотор-генератора. В отношении всех упомянутых свойств каскадный преобразователь будет занимать среднее положение.

Большей частью безопасность мотор-генератора и каскадного преобразователя при работе с частыми короткими замыканиями сводится в первую очередь к более благоприятным условиям коммутации. В обыкновенной машине постоянного тока магнитодвижущая сила якоря в комму-

¹⁾ Можно, повидимому, также использовать известный эффект Гёргеса, разомкнув одну из фаз пускового реостата.

тационной зоне может быть полностью уничтожена; в каскадном же преобразователе колебания магнитодвижущей силы якоря, не поддающиеся компенсации, благодаря преобладанию постоянного тока, оказываются меньше, чем в одноякорном преобразователе. Однако, с другой стороны, меньшее число полюсов постоянного тока (не связанное с частотой сети), потребное для этих машин, обеспечивает возможность строить последние с достаточной безопасностью для высоких напряжений постоянного тока. Число коллекторных пластин k , напряжение постоянного тока E_g и среднее напряжение между пластинами e_{sm} связаны между собою формулой:

$$k = \frac{2 p \cdot E_g}{e_{sm}} \dots \dots \dots (41)$$

Кроме того, для окружной скорости коллектора мы имеем:

$$v_k = \frac{k}{p} \cdot t_k \cdot f, \dots \dots \dots (42)$$

где t_k — коллекторное деление (ширина пластины + изоляция). Из обоих уравнений следует:

$$E_g = \frac{e_{sm} \cdot v_k}{2 \cdot t_k} \cdot \frac{1}{f} \dots \dots \dots (43)$$

Отсюда следует, что в обмотке якоря может быть достигнуто тем большее напряжение постоянного тока, чем больше напряжение между пластинами e_{sm} и окружная скорость коллектора v_k , с одной стороны, и чем меньше коллекторное деление t_k и частота в якоре f , с другой стороны.

Однако, величины v_k и t_k , благодаря конструктивным трудностям, ограничены. Величина же e_{sm} ограничена из соображений надежности в эксплуатации. Таким образом, напряжение постоянного тока зависит лишь от частоты в якоре. При $f=50$ периодов это напряжение иногда достигает около 1200 вольт.

Частота в якоре у каскадного преобразователя не равна частоте сети, как у одноякорного преобразователя, а составляет лишь часть последней

$$\left(\frac{p_g}{p_d + p_g} \cdot f \right).$$

Кроме того, частоту в якоре машины постоянного тока, составляющую часть мотор-генератора, можно сделать меньшей, выбрав для этого соответствующее число полюсов, равное

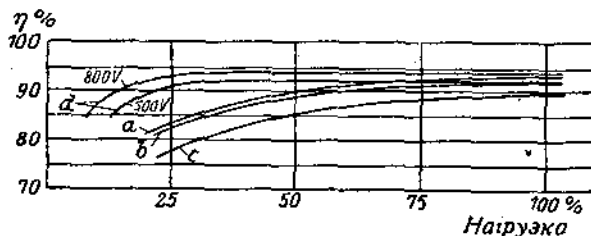
$$\left(\frac{p_g}{p_d} \cdot f \right).$$

Благодаря этому оба упомянутых типа преобразователей приспособлены для больших напряжений постоянного тока лучше, чем одноякорный преобразователь.

Если все же нежелательно отказаться от преимуществ одноякорного преобразователя, то для получения высоких напряжений постоянного тока соединяют последовательно два преобразователя, построенных на половинное напряжение каждый, и питают их или от отдельных трансформаторов, или от общего трансформатора с двумя отдельными вторичными обмотками.

Для того, чтобы коэффициент мощности был более благоприятным, следует отказаться от регулировки напряжения при помощи реактивных токов и предпочесть одноякорный преобразователь с вращающимся трансформатором или синхронным мотор-генератором.

В заключение для сравнения приводим на фиг. 361 коэффициенты полезного действия одноякорного преобразователя вместе с его трансформатором (*a*), каскадного преобразователя (*b*), синхронного мотор-генератора (*c*) и ртутно-выпрямительной установки (*d*), одной и той же мощности. В основу положены преобразователи в 1000 kW, 50 периодов и напряжения в 500 вольт, а для сравнения — и в 800 вольт. В то время как коэффициент полезного действия вращающихся преобразователей в пределах, приводимых на фигуре, почти не зависит от напряжения и изменяется лишь с нагрузкой, коэффициент полезного действия выпрямителя возрастает с увеличением рабочего напряжения и при нагрузках, превосходящих 25%



Фиг. 361. К. п. д. одноякорного преобразователя, включая трансформатор (*a*), каскадного преобразователя (*b*), синхронного мотор-генератора (*c*) и выпрямителя, включая трансформатор и вспомогательные аппараты (*d*).

от нормального, он остается почти постоянным. Как видно из фиг. 361, коэффициент полезного действия выпрямителя при 800 вольтах выше, чем при 500 вольтах, приблизительно на 20% и, кроме того, выше, чем у вращающихся преобразователей. При 600 вольтах коэффициенты полезного действия одноякорного преобразователя и выпрямителя для нагрузок больших, чем 60%, приблизительно равны между собою. Однако из этих выводов преждевременно делать заключения о том, что для напряжений больших, чем 600 вольт, должен применяться только выпрямитель, а для меньших напряжений — только вращающиеся преобразователи и в особенности одноякорный. Дело в том, что сравнительная оценка преобразователей и выпрямителя в настоящее время еще не может быть произведена с исчерпывающей полнотой и станет возможной лишь через несколько лет.

III. Электрические выпрямители.

Статья инж. Н. Jungmichl, Сименсштадт.

А. Ртутный выпрямитель.

§ 1. Введение.

В вольтовой дуге переменного тока, появляющейся между двумя неодинаковыми электродами, в общем случае наблюдается вентильное действие, т. е. при симметрическом напряжении переменного тока между электродами в одном направлении идет ток больший, чем в другом. Эта особенность вольтовой дуги давно известна. Вентильное действие сильно зависит от материала и устройства электродов, а также и от условий, в которых происходит горение вольтовой дуги.

Техническое применение этого принципа для выпрямления переменных токов в технике сильных токов зависит прежде всего от коэффициента полезного действия установки; кроме того, должна существовать возможность построить аппарат, относительно простой по своей конструкции и надежный при продолжительной работе. Оба условия осуществляются дугой ртутного выпрямителя, горящей в вакууме между ртутным катодом и твердыми анодами из графита или железа. С одной стороны, падение напряжения в выпрямителе, являющееся критерием для эксплуатационных потерь, в данном случае мало (приблизительно 20 вольт у обычных выпрямителей), с другой стороны, здесь имеет место автоматическое воссоздание ртутного катода благодаря обратному притеканию ртути к катоду. Расход материала на анодах практически отсутствует.

Ртутные выпрямители, работающие по вышеописанному принципу, получили поэтому широкое распространение в практической электротехнике. Их значение и область их применения растет тем быстрее, чем больше мощности оказывается возможным сосредоточить в одном аппарате.

Ртутные выпрямители можно делить на стеклянные и железные или мощные. Первые состоят из эвакуированного стеклянного сосуда. Последний, после тщательной откачки воздуха, запаивается и в таком виде сохраняет свой вакуум в эксплуатации. Для подведения и отведения токов, в стекло впаиваются металлические проводники. Аноды устраиваются по бокам главной колбы. Катод находится в нижней части сосуда. Для зажигания и возбуждения близко к катоду устанавливается вспомогательный анод. В зависимости от того, предназначен ли баллон для однофазного, трехфазного или шестифазного тока, у него устроены 2, 3 или 6 анодных „рукавов“.

Мощный выпрямитель большей частью состоит из железного сосуда, в котором устроены отверстия для ввода анодов и катода. Так как сосуд изготовлен здесь из электропроводящего материала, то вводы должны быть изолированы от него фарфоровыми изоляторами. Аноды находятся в крышке сосуда, а катод — в самом глубоком месте воронкообразного дна. Большинство мощных выпрямителей в настоящее время выполняются с 6

или 12 анодами для шестифазной работы. Так как откачка воздуха из сосуда требует здесь много времени и к тому же уплотнения обнаруживают склонность к пропусканию воздуха, то на практике, во время эксплуатации, каждый мощный выпрямитель снабжается воздушными насосами и вакуумметром, дающими возможность поддерживать и контролировать необходимый вакуум.

Выпрямитель действует в принципе как включающий аппарат, при чем ток проходит в нем только в одном направлении. Таким образом, в самом выпрямителе не возникает никаких напряжений, а потому подведенные напряжения не могут быть ни увеличены, ни уменьшены. Подведенное переменное напряжение и постоянное напряжение находятся между собою, следовательно, в строго определенном соотношении. Поэтому, если требуется перейти от данного переменного напряжения к определенному постоянному напряжению, то, вообще говоря, необходимо сначала трансформировать данное переменное напряжение до величины, соответствующей желательному постоянному напряжению. Это осуществляется при помощи трансформатора, являющегося существенной составной частью выпрямительной установки. Кроме того, трансформатор попутно решает еще одну задачу. Он дает возможность вывести нулевую точку системы переменного тока ¹⁾. Он к тому же облегчает переход от нормальной однофазной сети к двухфазной системе и от нормальной трехфазной сети к шестифазной системе ²⁾. Соединения при этом осуществляются так, что отдельные вторичные фазовые напряжения трансформатора подводятся к анодам выпрямителя. Катод образует положительный полюс сети постоянного тока, тогда как отрицательный полюс последней присоединяется к нулевой точке вторичной обмотки трансформатора.

Для работы выпрямителя требуются кроме того еще и различные дополнительные аппараты, как-то: дроссельные катушки для выравнивания получаемого пульсирующего постоянного тока или для параллельного соединения нескольких выпрямителей, выключатели со стороны переменного и постоянного токов, измерительные приборы для тока и напряжений, приспособления для возбуждения и зажигания выпрямителя и т. п. При стеклянном выпрямителе все эти вспомогательные аппараты монтируются вместе с баллоном на одном каркасе, прикрытом распределительным щитом. Все это вместе носит название *ртутно-выпрямительной установки*. В мощных выпрямительных установках сам выпрямитель устанавливается отдельно от вспомогательной аппаратуры; последняя же монтируется позади главного распределительного щита.

¹⁾ В том частном случае когда данное переменное напряжение соответствует желательному постоянному напряжению оказался бы необходимым трансформатор с коэффициентом трансформации 1:1. Его можно, конечно, заменить *л*-фазной дроссельной катушкой, соединенной в звезду, с нулевым проводом. Последний играл бы ту же роль, что и нулевой провод во вторичной обмотке трансформатора. При замене трансформатора дроссельной катушкой мы с экономим первичную обмотку.

Прим. переводчика.

²⁾ Ко всему перечисленному здесь автором статьи следует прибавить еще следующее. Из уже сказанного, а также и из § 8 этой главы, ясно, что значительная часть внешней характеристики выпрямителя имеет отрицательный характер, т.е. с увеличением нагрузки уменьшается падение напряжения в дуге, следовательно, напряжение увеличивается. Параллельная работа аппаратов и машин с такими характеристиками не может быть устойчивой. Внешнюю характеристику можно сделать положительной, если перед выпрямителем включить индуктивность (см. ниже). В нашем случае характеристика положительна благодаря реакции рассеяния трансформатора. Если, следовательно, со стороны переменного тока каждый выпрямитель соединен с отдельным трансформатором или с соответствующими фазами одного трансформатора, то параллельная работа окажется вполне устойчивой. О роли индуктивностей со стороны переменного тока, а также о параллельной работе будет подробнее сказано в дальнейшем.

Прим. переводчика.

§ 2. Историческое развитие.

Основное изобретение, касающееся применения дуги ртутного пара для выпрямления переменных токов в эвакуированных баллонах, было заявлено к патенту Купер-Юиттом (Cooper-Hewitt) в 1901 г. в Америке и в 1902 г. в Германии (американский патент № 955459, германский № 157642).

Построение стеклянных выпрямителей получило быстрое развитие. В короткое время удалось построить стеклянные выпрямители для небольших токов и для напряжений до 10 000 вольт. О немецких выпрямителях первые сведения появляются в 1907 и 1908 гг. Постепенно дошли до 40 ампер для одного стеклянного баллона. Эта нагрузка долгое время была максимальной. Лишь после введения искусственного воздушного охлаждения баллона при помощи вентилятора удалось строить баллоны для токов до 350 ампер при напряжениях до 600 вольт.

Труднее оказалось дело развития мощных выпрямителей, у которых хрупкие стеклянные сосуды были заменены железными цилиндрами.

Лишь спустя 10 лет после открытия принципа подготовительные работы расширились настолько, что оказалось возможным передать в эксплуатацию первые опытные установки. Главная работа, способствовавшая развитию пригодных для эксплуатации мощных выпрямителей, к этому моменту была проделана в Германии.

Начато было с конструкции выпрямителя для однофазного тока, при чем для использования обеих полуволи каждый анод помещался в двух отдельных сосудах. Предполагалось, что такое устройство предохранит от коротких замыканий между обоими анодами. Однако, это устройство предохраняло от обратных зажигания (прохождения тока в обратном направлении) благодаря нарушению вентильного действия) не больше, чем при установке анодов в одном цилиндре. Поэтому, при проектировании второй модели для многофазного тока перешли уже к расположению анодов по окружности одного общего сосуда, так что пространство посередине оставалось свободным для конденсирования паров ртути. Этот конструктивный принцип, оказавшийся чрезвычайно удобным, применяется и до настоящего времени в новейших мощных выпрямителях. За последние годы введены различные улучшения в конструкцию анодов. Усовершенствования касались все время, главным образом, внутреннего устройства сосуда. Развитие строения выпрямителей продвинулось настолько, что в настоящее время оказывается возможным строить надежно работающие мощные выпрямители для 1200 и 1500 вольт при мощности выше 1000 kW со стороны постоянного тока. Напряжение в некоторых установках доводилось до 2000 и 4000 вольт при токах до 1500 и 2000 ампер на один сосуд.

В настоящее время мощные выпрямители строятся Акционерным обществом Броун-Бовери и К^о (Brown-Boveri) в Бадене (Швейцария), Всеобщей компанией электричества (AEG) в Берлине, на заводах Сименс-Шуккерт (Siemens-Schuckert) в Берлине, а с 1924 г. также и на заводах Бергманн (Bergmann) в Берлине.

§ 3. Процессы в катоде.

Физические процессы внутри ртутного выпрямителя большой мощности чрезвычайно сложны и зачастую не поддаются точному исследованию. В дальнейшем опишем вкратце явления, возникающие в выпрямителе. Объяснение процессов вытекает из общих законов строения атома и потока носителей электрических зарядов в разреженных газах. Исследования в этой области в настоящее время еще в значительной мере не закончены, ряд

вопросов пока остается открытым. Можно сказать, что здесь, так же как и во многих аналогичных случаях, точное научное исследование сильно отстает от технического развития. Тем не менее, для объяснения процессов за последние годы был предпринят целый ряд исследований, на которых мы в дальнейшем кратко остановимся ¹⁾.

Начнем с процессов в катодe. Во время работы ртутного выпрямителя на катодe наблюдается чрезвычайно яркое пятно, блуждающее с большой скоростью по поверхности ртути. При больших нагрузках (выше 100 ампер) раскаленное до бела пятно делится на несколько частей, вновь соединяющихся через неопределенные промежутки времени. Ртуть вблизи катодного пятна сильно кипит.

Поверхность пятна очень мала. Согласно измерениям Гюнтер-Шульце (Günter-Schulze) ²⁾, она составляет около $2,5 \times 10^{-4}$ амп./см², что соответствует плотности тока около 4000 амп./см². Было найдено, что в стеклянном выпрямителе ртуть испаряется в количестве около $7,2 \cdot 10^{-3}$ г на 1 ампер тока, проходящего через дугу в одну секунду. Такое же количество, разумеется, должно быть охлаждено в конденсационном пространстве. Благодаря высокой температуре и большой плотности тока возникает дуга из ртутных паров, исходящих из пятна и с силой отбрасываемых от катода. Ионы ртути, устремляющиеся к катоду, при этом оттесняются в сторону и встречают все новые и новые места на катодe, что и вызывает блуждание пятна на поверхности ртути. Благодаря быстрому блужданию пятна давление ртутных ионов с одной стороны и реакция паровой дуги с другой стороны не могут действовать на ртуть с полной силой. По приблизительным подсчетам давление ртутных паров непосредственно у катода равно нескольким атмосферам. При таких давлениях пара длина свободного пути положительных ртутных ионов, притягиваемых к катоду, составляет вблизи катода небольшую величину (порядка 10^{-8} см). На катодe при этом появляется соответствующий тонкий слой положительного пространственного заряда. Падение напряжения в катодe составляет около 9 вольт, таким образом, в той области, где это падение происходит, мы имеем градиент потенциала во много миллионов вольт на см. При таких условиях электроны, которые должны выбрасываться катодом для поддержания дуги, имеют возможность отделяться и от относительно холодной поверхности ртути (около 600°С в катодном пятне). Благодаря этому ток через катод передается на 56% электронами, а на 44% — ионами.

Последние подводят к катоду на каждый ампер катодного тока следующие количества энергии:

Кинетической энергии (падение в катодe)	4 W.
Электрической " (нейтрализация)	3,1 "
И т о г о	7,1 W.

Эта энергия расходуется в катодe следующим образом:

Работа отрыва электронов.	2,2 W.
Теплота испарения ртути	2,2 "
Теплота, отводимая ртутью.	2,7 "
И т о г о	7,1 W.

¹⁾ J. Langmuir, G. E. Rev. 26. 731. 1923.—Günter-Schulze, Eng. Progress 6 251. 1925.—D. C. Prince J. op. ASEE 1927, S. 667.

²⁾ A. Günter-Schulze, Z. f. Phys. 11. 74, 1922.

В области катодного падения электроны приобретают кинетическую энергию приблизительно в $5W/\text{амп.}$, часть которых, а именно $3,1W$, расходуется на расщепление атомов. Эта энергия снова возникает в качестве энергии нейтрализации в катод. Остальные же $1,9W$ переходят в пространство разряда. Это постоянное пополнение является главным условием для получения дуги. Если возникновение электронов прекращается хотя бы на весьма малое время, то дуга моментально потухает. Поэтому на практике при колеблющейся или прерывистой нагрузке предусматривают постоянное возбуждение вспомогательной дугой.

§ 4. Процессы в дуге.

Дуга, возникающая между катодом и анодами, имеет фиолетовую окраску, яркость которой возрастает по мере увеличения нагрузки. Внутреннее пространство выпрямителя во время работы заполняется ртутными парами, непрерывно поступающими от катода и осаждающимися на поверхностях конденсации. Давление пара, устанавливающееся в баллоне, зависит от нагрузки и от условий охлаждения. При работе оно не должно переходить определенных границ. Более точное исследование условий прохождения пара выполнено Гюнтер Шульце ¹⁾.

Светящееся пространство между катодом и анодом, представляющее собою путь положительного разряда, содержит, кроме молекул ртутных паров, еще и относительно небольшое количество электронов и положительных ионов, находящихся в постоянном, неопределенном движении. Так как в пространстве заряды должны оказаться равными, то можно считать, что в любой момент в каком-либо определенном объеме заключаются одинаковые количества электронов и ионов, при чем эти равные заряды имеют противоположные знаки. Но в виду того, что масса весьма тяжелых ртутных ионов значительно больше массы электронов, последние движутся в пространстве под действием электрического поля с значительно большей скоростью и воспринимают практически всю силу тока, проходящего по дуге.

Благодаря упругим столкновениям с молекулами газа электроны движутся не только по направлению электрического поля. Они движутся в неопределенном порядке во всех направлениях и диффундируют также и в поперечном направлении, т. е. к стенкам сосуда. При этом отклоняются от своих прямолинейных направлений и носители положительного заряда, так как заряды, возникающие в пространстве благодаря движению электронов, должны снова нейтрализоваться положительными зарядами. Законы возникающей таким образом диффузии и связанного с этим распределения градиента потенциала по цилиндрическому пути тока были исследованы Schottky ²⁾. Его выводы весьма общего характера действительны лишь для упрощенной гипотезы, а потому не могут быть применены непосредственно к процессам в ртутном выпрямителе. Носители электричества, оторвавшиеся благодаря диффузии при главном разряде, должны быть снова замещены путем ионизации дуги. Напряжение для возбуждения ртутных паров составляет по Франку и Герцу ³⁾ $4,68$ вольт. До тех пор, пока электроны обладают скоростями, соответствующими незначительному проходящему падению потенциала, происходят упругие столкновения с молекулами ртути. При этом электроны, отражавшие почти без потерь, начи-

¹⁾ A. Günter-Schulze, Z. f. Phys. 11. 260, 1912.—A. Günter-Schulze. Elektrische Gleichrichter und Ventile. Издание Joseph Kösel u. Friedrich Pustet, Kempten, 1924.

²⁾ W. Schottky, Phys. ZS. 25. 342, 1924.

³⁾ Franck und Heriz. Phys. ZS. 20. 132. 1919; 22. 388, 1921.

нают под влиянием действующего электрического поля собирать все большие и большие количества энергии. Когда скорость электрона достигает упомянутого значения, происходит возбуждение ртутного атома. Электроны, описывающие в ртутном атоме большие траектории вокруг положительного ядра атома, начнут проходить по еще большим траекториям. При соответствующей плотности тока это возбуждение распространяется благодаря резонирующим лучам и ведет при продолжающемся усилении тока к дальнейшим толчкам электронов и, наконец, к полному отщеплению отдельных электронов. Таким образом можно доказать, что в пространстве дуги может возникнуть ионизация и в том случае, если напряжение дуги остается значительно меньше напряжения ионизации ртутных паров, равного 10,38 вольт.

Наибольшая концентрация носителей зарядов наблюдается по оси потока. Их плотность постепенно уменьшается по направлению к периферии и у стенок может оказаться даже равным нулю. Возбуждение и ионизация, возрастающие по мере увеличения плотности тока, будут по оси потока, следовательно, наибольшими и распространятся наружу по направлению к стенкам лишь при достаточной концентрации носителей зарядов. Таким образом, при средних плотностях тока получается дуга определенного диаметра. Благодаря потерям энергии, возникающим при возбуждении, газ сильно нагревается и, согласно исследованиям Günter-Schulze, достигает по оси разряда у технических выпрямителей температуры в несколько тысяч градусов. Возникающая при этом теплота отводится наружу окружающими ртутными парами. Потери тем больше, чем больше плотность тока при разряде. С увеличением потерь возрастает и падение напряжения в дуге, составляющее у выпрямителей, употребляемых в технике, около 0,2 до 0,3 вольт на см длины дуги. В смысле увеличения потерь на работу выпрямителя неблагоприятно действуют и посторонние газы, находящиеся в баллоне наряду с ртутными парами. Дело в том, что эти газы обладают значительно большей теплопроводностью, чем ртутные пары, и увеличивают потери в потоке, а следовательно, и падение напряжения в дуге.

§ 5. Процессы в анодах.

По Гюнтер-Шульце ¹⁾ падением в анодах называется „падение напряжения, вызванное отрицательным пространственным зарядом и способствующее возникновению в пространственном заряде необходимого количества положительных ионов“. Так как образование ионов сильно зависит от плотности окружающих газов, то падение в анодах зависит от давления пара у анода. Кроме того, наблюдается зависимость и от формы и материала электродов. От температуры и силы тока падение в анодах не зависит. Абсолютное значение падения напряжения на аноде, согласно измерениям, произведенным при помощи вспомогательных электродов (зондов), колеблется в зависимости от интенсивности возбуждения между обоими кривыми фиг. 362.

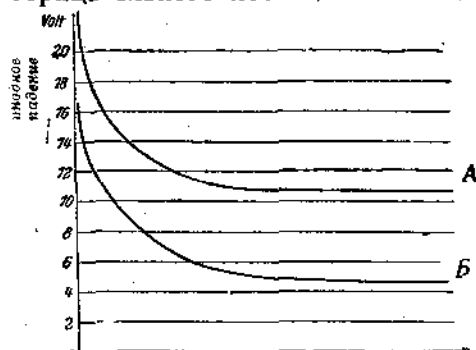
Шоттки и Иссендорфф ²⁾ заинтересовались своеобразными особенностями металлического сосуда мощных выпрямителей ³⁾. Они исследовали явления, возникавшие у зондов в дуге ртутного выпрямителя. Согласно этим исследованиям, благодаря тому, что скорость отрицательных электронов больше скорости положительных ионов приблизи-

¹⁾ A. Günter-Schulze Z. f. Phys. 13 378, 1923.

²⁾ W. Schottky und v. Issendorff. Z. f. Phys. 26, 85, 1924.

³⁾ M. Schenkel und W. Schottky Wiss. Veröff. des Siemens-Konzerns. 2. 252. 1922.

тельно в 400 раз, каждый изолированно насаженный зонд заряжался до отрицательного потенциала около 4—5 вольт. Таким образом при измерении у зондов получались значения для падения в аноде большие на эту величину. Действительное падение в аноде составляло бы лишь 1—2 вольта.



Давление ртутных паров А—Верхний предел
Б—Нижний предел

Фиг. 362. Падение в аноде.

Langmuir¹⁾, также заинтересовавшийся этим вопросом, пришел при своих исследованиях к аналогичным результатам. Относительную значительность энергии у анодов, обнаруженную Günter-Schulze, согласно исследованиям Langmuir'a, пришлось бы объяснить энергией нейтрализации электронов у анода.

Энергия, освобождающаяся у анодов, передается анодам в виде теплоты. Последние нагреваются настолько, что тепло, отдаваемое ими путем конвекции и лучеиспускания,

становится равным подведенному теплу.

§ 6. Зажигание и потухание дуги.

При эксплуатации выпрямителей следует отличать понятие „напряжение дуги“, необходимое для поддержания дуги после зажигания, от понятия „напряжение зажигания“, необходимого для создания дуги.

При нормальных условиях работы оба напряжения отличаются друг от друга лишь на несколько вольт. Из исследований Гюнтер-Шульце²⁾ вытекает, что разница между обоими напряжениями при известных обстоятельствах может превысить 100 вольт. Можно в общем сказать, что напряжение зажигания будет тем больше, чем выше давление ртутных паров и чем длиннее анодные рукава, так как с возрастанием этих величин возрастает и путь, проходимый электронами от катода к аноду. Температура анода также влияет на величину напряжения зажигания, при чем при малом давлении лучше зажигаются холодные аноды, а при большом давлении — горячие аноды. При давлении ртутных паров приблизительно в 0,1 мм напряжение зажигания будет наименьшим. После того как дуга зажглась, достаточно для поддержания работы выпрямителя меньшего напряжения дуги.

Для существования дуги требуется, чтобы катодное пятно все время сохраняло определенную температуру. Летящих по направлению к катоду положительных ионов должно, следовательно, оказаться достаточное количество, чтобы соответствующим образом разогреть места, в которых происходят удары. Таким образом, длительная работа выпрямителя окажется возможной лишь в том случае, если ток нагрузки не упадет ниже определенной величины. Эта величина у нормальных стеклянных выпрямителей составляет от 4 до 5 ампер, а у мощных — несколько больше. Величина минимального тока сильно зависит от температуры помещения, в котором находится выпрямитель. В холодных помещениях (температура ниже нуля) выпрямитель потухает значительно раньше; так как здесь необходим больший нагрев катода. В эксплуатационной практике вопрос о минимальном токе отходит на задний план, так как в настоящее время почти все выпрямители выполняются с вспомогательным возбуждением.

1) I. Langmuir Gen. El. Rev. 28. 731. 1923. Journ. Franklin Inst. 1913 S. 751.

2) A. Günter-Schulze, Archiv f. Elektrot. 12. 121, 1923.

Потухание дуги протекает в очень короткое время. При прерыве тока на время даже несколько меньшее, чем 0,00001 секунды, дуга потухает и требует зажигания заново. Такой чрезвычайно быстрый разрыв тока может оказаться роковым в том случае, если в цепи имеются какие-либо индуктивности, например дроссели для сглаживания тока. Накопленная в них во время работы магнитная энергия при разрыве тока внезапно освободится и вызовет в цепи перенапряжения, могущие повлечь к пробою изоляции. Это было подробно исследовано Лассеном (Lassen)¹⁾. Подобные перенапряжения, особенно при работе выпрямителей в холодных помещениях, достигают иногда больших значений. Установку при этом принято защищать включением параллельно к дуге и к индуктивностям высокоомных сопротивлений или конденсаторов, могущих воспринять энергию выключения²⁾.

На напряжение зажигания можно подействовать изменением электрического поля между катодом и анодом. Это повело к устройству у выпрямителей так называемых зажигательных поясов. Они состоят из токопроводящих, прикрепленных к стеклянным трубкам, анодных рукавов или в небольших расстояниях от них вблизи анода и соединенных с последними электрически. Этим самым удастся избежать также и вредного в работе пыления дуги, наблюдаемого иногда в холодных помещениях. Если соединить эти обкладки с катодом, то зажигание нормальной дуги будет сильно затруднено, а при известных обстоятельствах и совершенно уничтожено.

Эти явления были подробно исследованы Дюруае и Тулоном³⁾ и использованы для устройства чрезвычайно чувствительного реле большой мощности.

§ 7. Нарушение вентильного действия. Обратные зажигания.

Вентильное действие ртутной дуги несовершенно. При нормальной работе выпрямителя и в противоположном направлении течет незначительный ток порядка нескольких миллиампер, для которого анод выпрямителя является катодом. При известных условиях этот обычно ничтожный обратный ток можно внезапно увеличиться и выпрямитель потеряет свое вентильное действие. В случае, когда напряжение сети постоянного тока поддерживается еще и другими аппаратами, в выпрямителе от катода к аноду потечет обратный ток, могущий принять опасные размеры. Одновременно с этим через аноды выпрямителя замыкается накоротко главный трансформатор. Это явление, весьма нежелательное в работе, называют обратным зажиганием.

Гюнтер-Шульце исследовал условия тихого разряда в обратном направлении и нашел, что падение напряжения тихого разряда возрастает с уменьшением давления пара и что для случая хорошо эвакуированного железного сосуда оно для ртутных паров больше, чем для других газов⁴⁾. Как далеко простирается граница естественного обратного зажигания в хорошо эвакуированном сосуде ртутного выпрямителя — сказать с полной определенностью трудно. Во всяком случае возможности в этом направлении в современных конструкциях ртутных выпрямителей полностью далеко не исчерпаны. Весьма неблагоприятно в отношении надежности

¹⁾ H. Lassen. Archiv f. Elektrot. 13. 311, 1923.

²⁾ Кроме того, применяются роговые разрядники, присоединяемые к анодам.

Прим. переводчика.

³⁾ L. Dunoyer u P. Toulon. Journ. de Phys. et de Radium. 5.257.289, 1924.

⁴⁾ A. Günter-Schulze. Z. f. Phys. 15.244, 1923.

от обратных зажиганий действуют остатки газов в сосуде. Последние повышают давление пара в выпрямителе и этим понижают предел обратного зажигания. Кроме того, в настоящее время под действием дуги и при наличии кислорода (O_2) железные аноды окисляются и распыляются. Весьма мелкие частицы пыли окружаются слоем ртути и образуют вязкую мазь, отлагающуюся на стенках сосуда. Точно также действует и угольная пыль, освобождающаяся под действием дуги при наличии, например, органических веществ в сосуде выпрямителя. Эта мазь, которая часто обнаруживается в загрязненных выпрямителях, ведет рано или поздно даже при нормальном давлении и относительно небольших напряжениях к коротким замыканиям. Поэтому при сборке выпрямителя необходимо соблюсти абсолютную чистоту.

На надежность от обратных зажиганий оказывает влияние также и температура анодов. При нагревании до красного каления катодное падение увеличивается. Последнее объясняется тем, что при более высоких температурах окружающий газ также нагревается и разрежается. Поэтому при нормальной работе необходимо обеспечить такие условия охлаждения анодов, при которых анод не оставался бы слишком холодным. Кроме того, при холодных анодах может легко оказаться, что ртуть начнет конденсироваться на них, что будет способствовать образованию на них катодного пятна. Аналогичную роль может играть загрязнение анодов. Благодаря последнему ток концентрируется на относительно небольших поверхностях, разогревая их до белого каления, что ведет непосредственно к обратному зажиганию. Точно так же действуют и ртутные брызги, попадающие почему-либо с катода на анод. Поэтому у стеклянных выпрямителей баллоны оказываются более надежными в эксплуатации, если их анодные рукава изгибать так, чтобы анод не мог соединиться с катодом по прямой линии. Также и у мощных выпрямителей оказалось целесообразным дать один или два изгиба дуге с таким расчетом, чтобы аноды были по возможности защищены от прямолинейных лучей катода. Здесь это достигается устройством защитных листов или труб вокруг анодов.

§ 8. Характеристика напряжения дуги.

Как это следует из вышесказанного, напряжение между анодом и катодом после зажигания быстро падает и продолжает уменьшаться благодаря интенсивной ионизации при возрастающей силе тока. Это происходит до тех пор, пока дуга имеет достаточно места в сосуде для своего расширения. При дальнейшем увеличении силы тока расширение дуги ограничивается стенками сосуда. Кроме того, возрастает давление пара в сосуде, падение напряжения в дуге, благодаря возросшим потерям энергии, начинает снова возрастать. Имеется, следовательно, некоторый определенный ток нагрузки, при котором падение напряжения в выпрямителе будет минимальным.

Статическая характеристика дуги, выражающая зависимость падения напряжения от тока нагрузки в выпрямителе, имеет большое значение при проектировании, а также и при эксплуатации. Эта характеристика, с одной стороны, определяет в принципе условия нагрузки многофазного выпрямителя и связанного с ним трансформатора, а с другой стороны, дает возможность установить пределы нагрузки для определенной рассматриваемой конструкции, так как по характеристике можно сделать приблизительное заключение об условиях давления пара. Нормальной нагрузкой будет считаться та, при которой выпрямитель работает приблизительно с минимумом падения напряжения. Это дает нам известную гарантию

в том, что при этом будет избегнута опасная для эксплуатации перегрузка и что выпрямитель будет работать с наименьшими потерями.

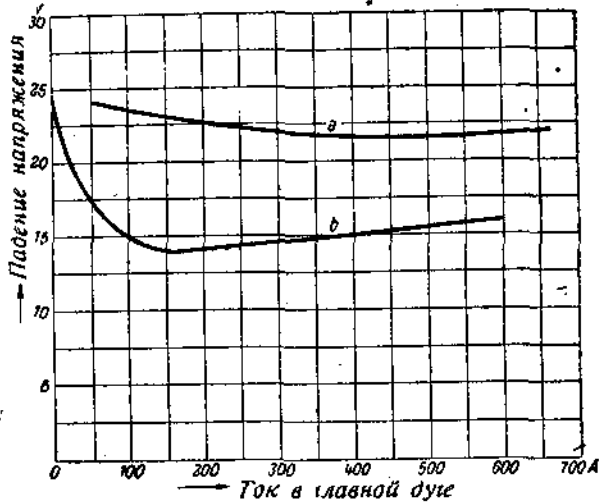
На практике при непосредственном определении характеристики напряжения принято пользоваться постоянным током для измерений; при этом аноды равномерно нагружены. Токораспределение при этом несколько иное, чем при нормальной работе выпрямителя. Условия давления пара, зависящие главным образом от тока нагрузки в катод, приблизительно одни и те же. На фиг. 363 представлена характеристика дуги, снятая по описанному методу для главной дуги и дуги возбуждения у мощного выпрямителя фирмы Сименс-Шуккерт.

Здесь ясно видны отрицательный вначале характер кривой, линии падения напряжения и возрастание напряжения при дальнейшем увеличении нагрузки.

Для практических расчетов и проектов незначительное изменение падения напряжения при различных нагрузках играет лишь второстепенную роль. Влияние падения будет тем меньше, чем больше напряжение постоянного тока. Поэтому, как правило, считают, что падение напряжения в выпрямителе e_0 не зависит от нагрузки и принимают его равным приблизительно 20 вольтам.

§ 9. Условия нагрузки.

Характеристика дуги сильно влияет на токораспределение в выпрямителе при его многофазной работе. Поэтому в качестве примера мы рассмотрим трехфазный выпрямитель, питаемый от нормального трехфазного трансформатора. Принципиальная схема представлена на фиг. 364. Напряжения трех фаз этой системы e_1, e_2, e_3 , которые мы считаем синусоидальными, сдвинуты друг относительно друга на 120 электрических градусов (см. фиг. 365, табл. 1). Если какая-либо фаза питает через выпрямитель сеть постоянного тока, то со стороны последней будет действовать фазовое напряжение, уменьшенное на величину падения напряжения в выпрямителе. Для одновременной работы нескольких анодов действительно, вообще говоря, условие, что алгебраическая сумма напряжений между нулевой точкой трансформатора и общим катодом одинакова для соответствующих анодов. Для простого случая, когда в цепи анодов отсутствуют какие-либо сопротивления, мы получаем такую сумму напряжений, вычитывая в любой момент от синусоидального фазового напряжения величину падения напряжения в дуге. В один какой-либо момент эта разность для двух анодов одинакова. Этим объясняется стремление дуги сосредоточиться при многофазной работе только на одном аноде, несмотря на то, что несколько анодов имеет положительный потенциал относительно катода. При этом прохождение тока имеет место через тот анод, который имеет наибольший

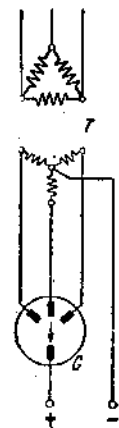


Фиг. 363. Характеристика напряжения выпрямителя: а — падение напряжения в главной дуге; б — падение напряжения в дуге возбуждения.

потенциал. В тот момент, когда напряжение горящего анода достигает значения напряжения следующей фазы, дуга мгновенно переходит на другой анод. Таким образом дуга действует как переключатель, автоматически соединяющий фазу, имеющую наибольшее напряжение, с одним и тем же общим катодом¹⁾. Длительность горения анода или частота переключений анодов зависит главным образом от числа фаз при эксплуатации.

Постоянное напряжение e_g пульсирует соответственно переменным напряжениям и сохраняет благодаря переключениям анодов некоторую среднюю величину E_{gm} . Предполагая, простоты ради, наличие в цепи постоянного тока чисто омической нагрузки, мы получим, что постоянный ток i_g пропорционален постоянному напряжению. Он складывается из проходящих один за другим анодных токов. В продолжение некоторой части периода, соответствующей числу фаз, через аноды проходит полный постоянный ток. В остальное же время они лишены тока. Анодные токи представляют собой одновременно и вторичные токи трансформатора, ток в котором сильно отличается от обычных синусоидальных токов. Одновременное горение нескольких анодов, соответствующее в графическом изображении перекрытию анодных токов, появится лишь тогда, когда под действием добавочных напряжений в цепи анода последует выравнивание фазовых напряжений.

Такие добавочные напряжения всегда возникают благодаря нормальному рассеянию катушек трансформатора, что объясняется образованием магнитных полей вокруг отдельных катушек трансформатора. Эти поля могут возникнуть из-за ненормального рассеяния трансформатора, которое в свою очередь создается в известных соединениях при работе самого выпрямителя или из-за дросселей в цепи анодов. Там, где при большом числе фаз желательно иметь одновременное горение нескольких анодов, включают в цепь анодов или в нулевую точку трансформатора дроссельные катушки, благоприятствующие выравниванию соответствующих фазовых напряжений.



Фиг. 364.
Многофазный выпрямитель.

§ 10. Подсчет тока и напряжения.

Если пренебречь падением напряжения в дуге и считать переменное напряжение e синусоидальным, то получаются совершенно определенные отношения между эффективным переменным напряжением E и средним постоянным напряжением E_{gm} (отношение C_e) и между эффективным анодным током I и средним постоянным током I_{gm} (отношение C_i). Оба эти отношения зависят лишь от числа фаз и имеют большое значение при расчете установки. Для рассматриваемых чисел фаз на фиг. 365 табл. 1 показаны кривые, а также значения C_e и C_i . При практических подсчетах следует учитывать потери в выпрямителе и вспомогательной аппаратуре. Потребное переменное напряжение при холостом ходе получается тогда из формулы

$$E = (E_{gm} + e_0) C_e \cdot F_s,$$

где F_s обозначает здесь коэффициент надежности для получаемых в трансформаторе и вспомогательных аппаратах падений напряжения, возникающих между холостым ходом и полной нагрузкой. Как уже сказано выше, возникающее постоянное напряжение не сохраняет постоянную величину, а имеет некоторую переменную составляющую, быстро уменьшающуюся с увеличением числа фаз. При применении выпрямленного тока для известных целей эта составляющая сильно мешает, а потому желательно иметь возможно более

¹⁾ Иначе говоря, как синхронный переключатель.

постоянный выпрямленный ток. Сглаживание достигается включением в цепь постоянного тока дроссельной катушки. Об условиях распределения нагрузки в последней будет подробнее сказано ниже.

Для того, чтобы иметь критерий для пульсаций кривых постоянного тока, введем термин „волнистость“, т.е. отношение эффективного значения основной волны переменного напряжения E_v к среднему значению постоянного напряжения. Таким образом, в процентном выражении мы имеем для волнистости F :

$$F = \frac{E_v}{E_{gm}} \cdot 100\%.$$

Согласно этого определения мы получаем из кривых фиг. 365 табл. 1 следующие теоретические значения для „естественной волнистости“ постоянного напряжения:

однофазная работа	$F = 47,4\%$
трехфазная „	$F = 17,7\%$
шестифазная „	$F = 4,1\%$

Число фаз.	Постоянный ток				Анодный ток				Отношение значений	
	Форма кривой	Наибольшее.	Эффективное	Среднее	Форма кривой	Наибольшее	Эффективное	Среднее	C_{α} —эффект. анодного тока среди. напр. пост. тока	C_{ϕ} —эффект. фазов. напр. среди. напр. пост. тока
значение				значение						
1 (2)		1,00	0,71	0,64		1,00	0,50	0,52	0,785	1,110
3		1,00	0,84	0,83		1,00	0,49	0,28	0,587	0,855
6		1,00	0,95	0,95		1,00	0,39	0,16	0,409	0,740

Фиг. 365. Таблица 1. Формы кривых и расчетные величины.

Если принять, что при определенном постоянном напряжении E_{gm} выпрямитель дает ток, имеющий среднее значение i_{gm} , то форма кривой последнего будет сильно зависеть от рода нагрузки:

1. Если выпрямитель работает на чисто омическую нагрузку (R), то ток будет пропорционален выпрямленному напряжению и иметь ту же волнистость, что и напряжение. На практике этот случай встречается при работе выпрямителя на лампы или нагревательные приборы.

Тогда мы имеем:

$$e_g = i_g R.$$

2. Если в цепи нагрузки последовательно с омическим сопротивлением имеется индуктивность L , то волнистость тока смягчается. Степень сглаживания волнистости зависит от отношения индуктивного сопротивления к омическому. Так как первое прямо пропорционально частоте, то действие индуктивности будет тем сильнее, чем больше число периодов гармоники. Тогда мы имеем:

$$e_g = i_g R + L \frac{di_g}{dt}.$$

3. При работе выпрямителя на постоянное противодействующее напряжение E_0 , последовательно соединенное с сопротивлением, ток, вообще говоря, будет иметь большую волнистость, чем напряжение. Величина последней зависит тогда от отношения противодействующего напряжения к среднему постоянному напряжению и может принять большие значения, как, например, при зарядке батарей. Мы имеем тогда

$$e_g = E_0 + i_g \cdot R.$$

4. Если к противодействующему напряжению и омическому сопротивлению присоединяется еще и индуктивность, то получается действие, комбинарованное из случаев 2 и 3. При этом получаются большие пульсации тока, которые все же при данной индуктивности сильнее дросселируются благодаря наличию меньшего омического сопротивления по сравнению с случаем 2. Подобную нагрузку мы имеем, например, при работе выпрямителя на двигателя (тяговое дело) или при зарядке батарей в случае, если в цепи постоянного тока имеется сглаживающая дроссельная катушка.

§ 11. Коэффициент мощности и реактивная мощность.

Для суждения об условиях нагрузки в сетях переменного тока за последнее время при определении тарифов стали учитывать наряду с полезной расходуемой „действующей (активной) мощностью“ еще и „холостую“ или реактивную мощность. При синусоидальных кривых тока и напряжении можно сделать заключение о реактивной мощности по коэффициенту мощности, получаемому из определения

$$\text{коэффициент мощности} = \frac{\text{действующая (активная) мощность}}{\text{эффект. напряжение} \times \text{эффект. ток}},$$

что представляет собою косинус угла сдвига фаз между током и напряжением. При любой форме кривой тока и синусоидальном напряжении коэффициент мощности распадается на два множителя, оказывающие весьма различное влияние на условия нагрузки сети переменного тока.

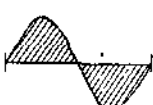
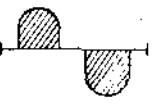
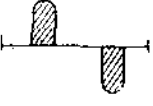
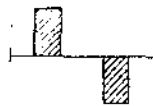
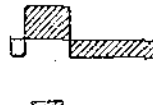
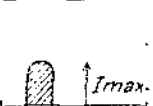
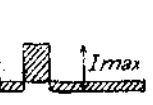
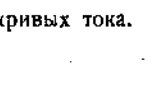
Коэффициент мощности:

$$\delta = \mu \cdot \cos \varphi.$$

а) Первый из двух множителей μ задан выражением

$$\mu = \frac{i_{\max}}{\sqrt{i_1^2 + i_2^2 + \dots}}$$

и называется коэффициентом нагрузки (или коэффициентом искажения). Он показывает влияние искажения тока относительно синусоидальной формы и представляет меру для добавочных нагрузок меди от гармоник ($i_2, \dots$), не участвующих в создании действующей мощности. Этот коэффициент имеет большое значение прежде всего для подсчета трансформатора. Так как коэффициент нагрузки не имеет ничего общего со сдвигом фаз в собственном смысле слова, то он не вызывает никакой реактивной мощности и не может компенсироваться опережающими токами. Коэффициент нагрузки с вторичной стороны трансформатора будет другим, чем с первичной стороны и в сети, так как форма кривой тока может меняться для отдельных частей установки. Он зависит прежде всего от числа фаз. На фиг. 366 табл. 2 даны коэффициенты нагрузки для наиболее часто встречающихся форм кривых в предположении, что форма кривой напряжения синусоидальна.

№	Форма кривой $I_{\max} = 1$	Эффектив. значение I	Среднее значение I_m	Кэффци. нагрузки μ	№	Форма кривой $I_{\max} = 1$	Эффектив. значение I	Среднее значение I_m	Кэффци. нагрузки μ
1		0,50	0,32	0,71	13		0,71	0,5	0,64
2		0,485	0,28	0,69	14		0,58	0,33	0,63
3		0,39	0,16	0,55	15		0,41	0,17	0,55
4		0,71	0	1	16		1	0	0,90
5		0,69	0	0,97	17		0,82	0	0,96
6		0,55	0	0,78	18		0,58	0	0,78
7		0,59	0	0,84	19		0,47	0	0,83
8		0,68	0	0,96	20		0,71	0	0,96
9		0,55	0,32	0,68	21		0,39	0	0,92
10		0,78	0	0,96	22		0,49	0	0,84
11		0,68	0,48	0,64	23		0,38	0	0,60
12		0,96	0	0,9	24		0,37	0	0,60

Фиг. 366. Таблица II. Форма кривых тока.

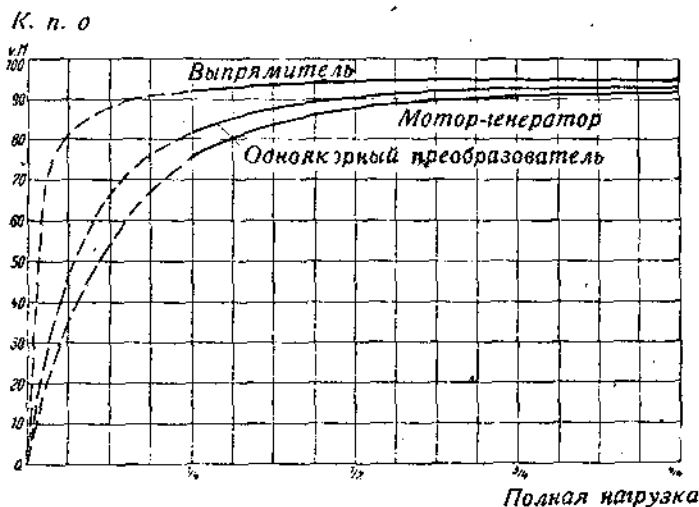
б) Второй из обоих коэффициентов — коэффициент сдвига — задается косинусом угла сдвига фаз между основной волной тока и напряжения и соответствует обычному $\cos \varphi$, принятому в технике переменных токов. Сдвиг фаз в выпрямительной установке очень мал и вызывается токами возбуждения и напряжениями рассеяния трансформатора, а также и индуктивностями дроссельных катушек в цепи анодов. Величина воспринимаемой реактивной мощности зависит исключительно от этого сдвига фаз и задается коэффициентом сдвига.

Так как гармоники тока с синусоидальным напряжением не дают никакой мощности, то во всех приборах, построенных по принципу ваттметра (измерители и счетчики реактивной мощности, измерители $\cos \varphi$), коэффициент нагрузки не будет сказываться, а будет определяться лишь реактивная мощность¹⁾.

Обычное измерение мощности, напряжения и тока дает нам коэффициент мощности, непосредственно не интересующий нас в выпрямительных установках.

§ 12. Коэффициент полезного действия.

Коэффициент полезного действия выпрямителя определяется как отношение полезной мощности со стороны постоянного тока к воспринимаемой мощности со стороны переменного тока. Так как на практике составляющая переменного тока, налагающаяся со стороны постоянного тока, в большинстве случаев не производит никакой работы, то под полезной мощ-



Фиг. 387. К. п. д. выпрямителя и преобразователя.

ностью следует понимать „чистую“ мощность постоянного тока, получающуюся измерением постоянного напряжения и постоянного тока при помощи приборов Де прэ. Мощность, воспринимаемая из питающей сети, обычно определяется при помощи ваттметров. Для коэффициента полезного действия можно также написать

$$\eta = \frac{\text{полезная мощность}}{\text{полезная мощность} + \text{потери}}.$$

¹⁾ M. Schenkel. ETZ. 46. 1369. 1399. 1925.

Потери в выпрямителе равны произведению из падения напряжения (принимаемого постоянным) в выпрямителе постоянного и тока

$$N_v = e_0 J_{gm},$$

т.е. потери пропорциональны среднему значению силы тока. В этом отношении у выпрямителя условия значительно благоприятнее, чем у большинства машин и аппаратов с металлическими проводниками, принятых в электромашиностроении, так как в последних потери возрастают пропорционально квадрату тока нагрузки, полезная же мощность возрастает лишь пропорционально силе тока. Таким образом мы имеем

$$\eta = \frac{E_{gm}}{E_{gm} + e_0}.$$

Коэффициент полезного действия выпрямителя не зависит, следовательно, от силы тока. Это ведет к тому, что годовой коэффициент полезного действия, равный отношению отданной к воспринятой мощности в продолжение целого года или определенного периода эксплуатации, имеет теоретически ту же величину, что и коэффициент полезного действия при полной нагрузке, тогда как последний у вращающихся преобразователей сильно падает, благодаря худшим коэффициентам полезного действия при частичных нагрузках (фиг. 367). Вследствие этого, применение ртутных выпрямителей в эксплуатации с сильно колеблющейся нагрузкой оказывается экономически чрезвычайно выгодным.

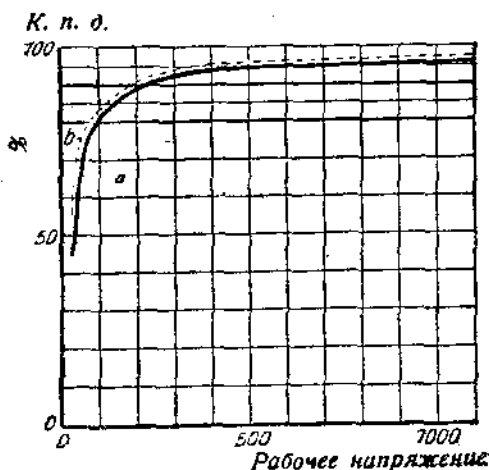
Из приведенной формулы следует, что коэффициент полезного действия зависит лишь от рабочего напряжения и с увеличением последнего постоянно возрастает (фиг. 368). Мы видим, что при напряжении в 1000 вольт потери в сосуде выпрямителя составляют не больше 2%.

Коэффициент полезного действия всей выпрямительной установки меньше на несколько процентов, чем у самого сосуда, так как здесь присоединяются еще потери в главном трансформаторе и вспомогательных аппаратах. В качестве потери следует рассматривать и мощность, расходуемую на возбуждение выпрямителя и работу охлаждающего вентилятора при больших стеклянных баллонах. При мощных выпрямителях сюда присоединяется мощность, необходимая для работы насосов. Все упомянутые потери будут сказываться тем слабее, чем больше мощность, сосредоточенная в одном выпрямителе.

§ 13. Нагревание и способность к перегрузке.

Потери, возникающие в различных частях выпрямителя, преобразуются в теплоту и повышают его температуру над окружающей средой.

Потери в анодах определяются главным образом из среднего значения анодного тока и почти не зависят от формы кривой последнего, тогда как потери в подводящих проводах и в трансформаторах зависят от эффектив-



Фиг. 368. К. п. д. и рабочее напряжение: a = к. п. д. установки; b = к. п. д. выпрямителя.

ного значения, а следовательно и от формы кривой. Теплота, возникшая в анодах, передается, во внешнее пространство двумя путями:

- 1) конвекцией через анодные вводы,
- 2) непосредственным лучеиспусканием в окружающий сосуд.

У стеклянных выпрямителей теплоотдача осуществляется главным образом через излучение, так как у них поперечное сечение входных стержней относительно ничтожно. Так как величина лучеиспускания возрастает значительно быстрее, чем превышение температуры, то с возрастанием силы тока выше определенного значения температура анодов начинает возрастать очень медленно. Благодаря этому в эксплуатации материал анода хорошо обеспечивается от перегрева. У мощных выпрямителей количество теплоты, отданное стенкам сосуда путем лучеиспускания, сильно зависит от конструктивного выполнения анодов. Лучеиспускание будет наибольшим тогда, когда анод расположен непосредственно против охлаждаемых стенок, и будет значительно меньшим в случае, если аноды окружены изолирующими цилиндрами. В последнем случае следует иметь в виду количество теплоты, отведенное вверх через ввод. Оно обычно отводится в окружающую атмосферу при помощи особых охлаждающих частей, надеваемых на анод. При этом необходимо следить за тем, чтобы уплотнение анода не перегревалось.

Теплота, освобождающаяся при падении в катод, большей частью передается ртути катода. У мощных выпрямителей охлаждение катода осуществляется пропусканием охлаждающей воды, необходимой для охлаждения сосуда, сначала через катод.

Весьма существенным является охлаждение сосуда, так как в дуге большая часть тепловых потерь освобождается, а условия давления пара сильно зависят от температуры стенок. У больших стеклянных выпрямителей в настоящее время употребляют воздушное охлаждение вентилятором, а для мощных выпрямителей применяется водяное охлаждение. Сосуд или окружается охлаждающим кожухом или же опускается непосредственно в водяной бассейн; при этом температура его поддерживается равной 30—40°.

Вопрос о способности к перегрузке при ртутных выпрямителях следует рассматривать с той же точки зрения, что и при электрических машинах. У последних предел способности к перегрузке определяется главным образом максимальной температурой, которую выдерживают изоляционные материалы. Главную роль играет здесь постоянная времени нагревания, которая определяет, с какой быстротой возрастание температуры следует за возрастанием нагрузки. Кроме того, во вращающихся преобразователях коллектор весьма чувствителен к сильным кратковременным перегрузкам. В выпрямителе развитие теплоты при перегрузках меньше, чем у вращающихся машин, так как потери возрастают лишь пропорционально силе тока.

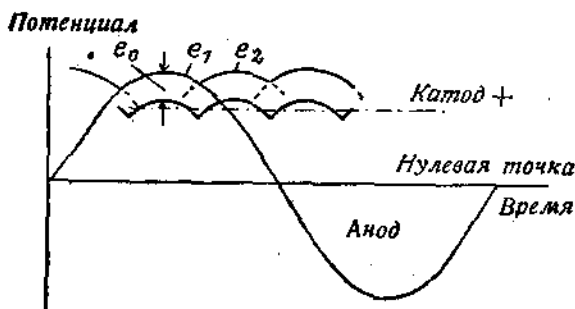
Постоянная времени к тому же значительно меньше, так как выпрямитель обладает небольшой массой. Для способности к перегрузке выпрямителя поэтому указан предел, определяемый давлением пара в сосуде, максимально допускаемым с точки зрения надежности от обратных зажиганий. Такое опасное возрастание давления пара возникает лишь при длительной сильной перегрузке, при которой нагревание уплотнений может также возрасти до недопустимых пределов.

В общем, перегрузки в 50% в течение 2 минут, обычно предписываемые машинам, безупречно переносятся выпрямителями. К кратковременным ударным перегрузкам ртутный выпрямитель весьма нечувствителен. Поэтому его следует считать самым пригодным для эксплуатации с сильно меняющейся нагрузкой (тяговое дело).

§ 14. Потенциал. Заземление.

У нормально нагруженного выпрямителя ток течет через вторичную обмотку трансформатора, выходит из анода, идет через дугу к катоду, откуда через положительные шины идет через нагрузку к отрицательной шине, а отсюда — к нулевой точке трансформатора. Движущей силой является напряжение, индуцированное в обмотке трансформатора со стороны переменного тока. Это напряжение вызывает прохождение тока через рассматриваемый анод и создает в нем положительный потенциал относительно катода. Напряжение между шинами постоянного тока при чисто омической нагрузке будет расходоваться в виде омического падения напряжения, тогда как при работе на двигатели или на зарядку батарей это

напряжение появляется как противодействующее напряжение. Если пренебречь падением напряжения в подводящих проводах, то положительная шина будет, следовательно, иметь потенциал катода, а отрицательная — потенциал нулевой точки вторичной обмотки трансформатора (фиг. 369). В общепринятой диаграмме напряжений нулевая линия будет соответствовать нулевой точке трансформатора и в то же время отрицательной шине. Потенциал катода относительно нулевой точки получается, если от фазового напряжения e_1 токопроводящего анода вычесть падение напряжения e_0 в дуге. Среднее значение этого потенциала определяется величиной и числом фаз напряжения переменного тока. В продолжение той части



Фиг. 369. Потенциалы в выпрямителе.



Фиг. 370. Распределение потенциала в установке.

периода, когда ток проходит через анод, последний будет иметь приблизительно постоянный потенциал около 20 вольт относительно катода. Во время остальной части периода разность потенциалов между анодом и катодом будет отрицательной и достигает отрицательного максимального значения, приблизительно равного двойной величине напряжения постоянного тока. Благодаря такому распределению напряжения вентиль будет в определенные моменты иметь двойное рабочее напряжение в направлении, не пропускающем ток.

Весьма наглядную картину распределения потенциалов в цепи можно получить, если на оси абсцисс нанести отдельные элементы цепи, а в качестве ординат — соответствующие потенциалы (фиг. 370).

Во вторичной обмотке трансформатора потенциал достигает известной величины и практически сохраняет ее постоянной вплоть до выпрямителя.

Здесь возникает падение в аноде e_a , падение напряжения в дуге e_d и падение напряжения в катоде e_k . Остальная часть напряжения используется в цепи постоянного тока.

При нормальной работе сосуд выпрямителя заряжается до потенциала большего, чем потенциал катода, на 8—15 вольт. Поэтому у мощных выпрямителей с металлическими сосудами оказывается необходимым изолировать катод от сосуда. Если эта изоляция во время работы нарушается, например, из-за загрязнения ртутью, то от сосуда к катоду потечет ток, могущий вызвать перепрыгивание катодного пятна на железную стенку, а также и обратные зажигания.

Так как в практической работе почти всегда заземляют один полюс сети постоянного тока, то железный сосуд будет иметь разность потенциалов относительно земли, приблизительно равную при заземлении отрицательного полюса значению полного напряжения постоянного тока, а при заземлении положительного полюса составляющую около 10 вольт. Отсюда вытекает необходимость изолировать сосуд от земли. Точно также следует изолировать от главного сосуда и части мощного выпрямителя, обслуживаемые во время работы, как, например, вакуумные краны, вакуумметр и воздушный насос, или же хорошо изолировать пол вокруг выпрямителя для безопасности обслуживания. Учитывая эти обстоятельства, следует при более высоких напряжениях заземлять в выпрямительных установках положительный полюс сети постоянного тока.

§ 15. Трансформатор.

Применяемые в электротехнике трансформаторы однофазного и трехфазного тока имеют целью трансформировать электрическую энергию на определенное желательное напряжение. Они обладают первичной обмоткой, присоединяемой к данному напряжению E_I , и вторичной обмоткой, дающей желательное напряжение E_{II} .

Отношение m обоих напряжений, называемое также передаточным числом или коэффициентом трансформации, зависит в первом приближении лишь от отношения числа витков z_I и z_{II} обеих обмоток:

$$m = \frac{E_{II}}{E_I} = \frac{z_{II}}{z_I}.$$

Так как, пренебрегая потерями, мы должны получить равенство получаемой и отдаваемой мощностей, то отношение токов нагрузки будет равно:

$$\frac{J_{II}}{J_I} = \frac{1}{m}.$$

При нормальной нагрузке с синусоидальными токами первичные и вторичные ампер-витки.

$$AW = J_I z_I = J_{II} z_{II},$$

являющиеся мерой при создании магнитного потока, почти взаимно уравновешиваются. Несколько отличается по своему действию трансформатор в выпрямительной установке, так как здесь он нагружается с вторичной стороны токами, текущими лишь в одном направлении. Он действует здесь как магнитное связующее звено между сетью переменного тока и выпрямителем.

Условия нагрузки обмоток здесь получаются более неблагоприятными, благодаря чему трансформатор для выпрямителя приходится рассчитывать на типовую мощность, большую чем та, которая соответствует мощности

постоянного тока. Для того, чтобы иметь возможность сравнивать между собою отдельные принципиально отличные друг от друга соединения, введено отношение:

$$C_t = \frac{\text{номинальная мощность трансформатора}}{\text{мощности постоянного тока}}$$

(см. ст. Krijger ¹⁾, Kaden ²⁾ и др.).

Для выяснения принципа действия лучше всего рассмотреть простое соединение (фиг. 371), при котором электрический вентиль включен во вторичную цепь трансформатора, присоединенного первично к синусоидальному напряжению. В этом случае вторичный ток будет пульсирующим постоянным током, так как вентиль пропускает ток лишь в одном направлении и не пропускает его в другом. Вторичный ток состоит, следовательно, если рассматривать аналитически, из слагающей постоянного тока, из основной волны переменного тока, имеющей частоту сети, и из соответствующих гармоник. В обычном виде мы имеем для вторичного тока:

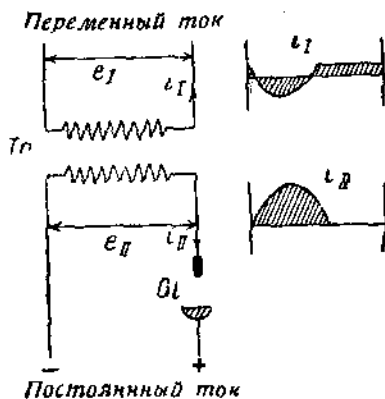
$$i_{II} = J_m + J_1 \sin \omega t + J_2 \sin (2\omega t) + \dots$$

На первичную сторону трансформатора оказывают влияние лишь те слагающие вторичного тока, которые изменяются во времени, так как только такие токи способны вызвать соответствующее изменение потока. Таким образом, первичный ток трансформатора является при всяких обстоятельствах чистым переменным током. Пренебрегая добавочными влияниями, можно для первичного тока написать:

$$i_I = \frac{1}{m} [J_1 \sin (\omega t) + J_2 \sin (2\omega t) + \dots]$$

Так как все гармоники трансформируются с одинаковым коэффициентом, то форма кривой в главных своих чертах переносится без изменений в первичную обмотку, но все же кривая оказывается сдвинутой относительно нулевой линии на величину слагающей постоянного тока. На эту особенность трансформатора, имеющую на практике большое значение при его расчете, было обращено внимание Faye-Hansen'ом ³⁾. Почти во всех работах [как-то: Krijger Kaden, Dällenbach и Gerecke, ⁴⁾ K. E. Müller ⁵⁾], этому уделено мало внимания. Из кривых тока следует, что ампер-витки с первичной и вторичной сторон неодинаковы. Благодаря этому получаются добавочные потоки рассеяния, которые в свою очередь оказывают известное влияние на токораспределение и вызывают со стороны постоянного тока относительно большое падение напряжения между холостым ходом и полной нагрузкой.

Для ртутных выпрямителей описанное соединение на практике не применяется. Для них применяют обычно соединения двух-, трех- или шестифазные с трансформаторами, имеющими два или три керна. В этом случае, благодаря общему железному сердечнику, возникает магнитная



Фиг. 371. Однофазный трансформатор.

¹⁾ L. P. Krijger, De Ingenieur 36. 144, 1921.

²⁾ H. Kaden. Wiss. Veröf. aus dem Siemens-Konzern 3.42. 1923.

³⁾ K. Faye-Hansen ETZ 46. 1104, 1925.

⁴⁾ W. Dällenbach und E. Gerecke Arch. f. Elektrotechnik 14. 171, 1924.

⁵⁾ K. E. Müller. Der Quecksilberdampfgleichrichter, Band 1. Julius Springer, 1925.

сопряженность отдельных фаз, что, в зависимости от применяемого соединения, по-разному действует на токораспределение в обмотках. Такая магнитная сопряженность пропадает в том случае, если вместо общего сердечника применяются отдельные трансформаторы для каждой фазы.

Для определения условий нагрузки, которые будут отличаться друг от друга в зависимости от выбора соединения, действительны следующие законы:

1. Через два анода будет одновременно проходить ток лишь тогда, когда сумма напряжений в отдельных цепях анода одинакова.

2. Ток, текущий с первичной стороны трансформатора, должен быть правильным синусоидальным током.

3. В разветвлениях проводов алгебраическая сумма токов должна в любой момент равняться нулю.

4. Магнитные потоки в общем сердечнике многофазного трансформатора должны находиться в равновесии.

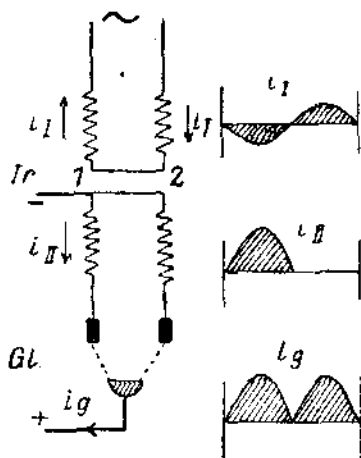
С точки зрения этих законов мы и рассмотрим в дальнейшем наиболее существенные соединения трансформаторов. Падение напряжения в выпрямителе, не имеющее здесь принципиального значения, будет нами оставлено без внимания. Коэффициент трансформации m , для которого мы приняли отношение между вторичным и первичным фазовыми напряжениями, здесь мы будем считать равным единице. Намагничивающим током трансформатора мы пренебрегаем.

§ 16. Трансформатор однофазного тока.

Присоединение выпрямителей к однофазному току возможно лишь при малых установках, так как у них мы имеем относительно большую волнистость постоянного тока.

А. Рассмотрим сначала однофазный трансформатор с двумя обмотанными кернами, при чем как первично, так и вторично обмотки кернов соединены последовательно. У вторичной обмотки выведена средняя точка и служит для присоединения отрицательного провода. Обе полученные таким образом вторичные фазы, напряжение которых сдвинуто на 180° , подводятся к двум анодам выпрямителя (фиг. 372). Ток i_{II} может проходить в цепи анодов лишь в направлении от нулевой точки и вызывает с первичной стороны соответствующий ток i_I , который, благодаря последовательному соединению, вынужден проходить и через первичную обмотку второго керна. При этом магнитно возбуждается и kern 2. Токораспределение устанавливается так, что оба керна оказываются в магнитном равновесии, т.е. сумма ампер-витков на керне 1 равна сумме ампер-витков на керне 2. Таким образом мы получаем кривую силы тока, представленную на фиг. 372.

Оба керна в любой момент намагничены в одном и том же направлении. Возникающий при этом добавочный поток рассеяния, соответствующий возбуждению, вызываемому половинным числом вторичных ампер-витков, — проходит через оба керна в одном и том же направлении и замыкается

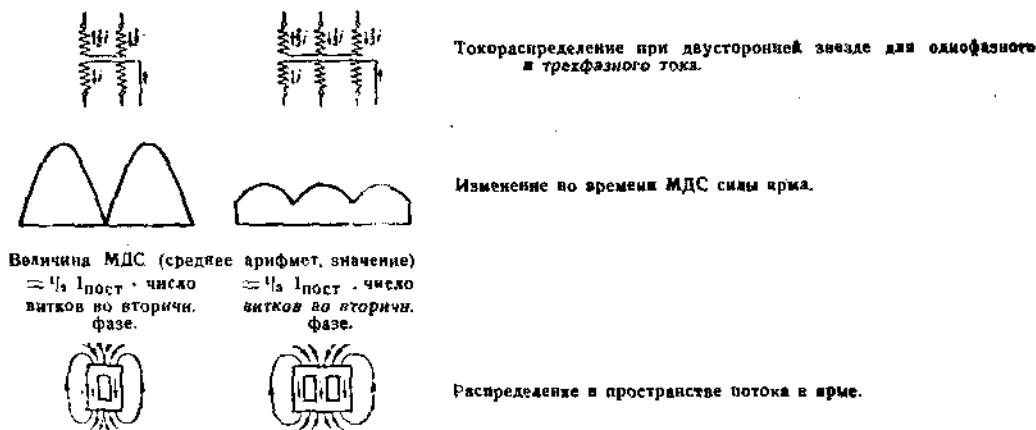


Фиг. 372. Трансформатор однофазного тока. Последовательное соединение.

от ярма к ярму через окружающий воздух (см. ст. Шенкеля)¹⁾. Добавочный поток изменяется по той же кривой, что и анодный ток, и сохраняет свое направление и при перемене анодов (фиг. 373).

Здесь возникает, следовательно, пульсирующий поток, намагничивающий весь трансформатор в одном направлении и оказывающий определенное действие на условия нагрузки трансформатора. Дело в том, что этот поток индуктирует в обмотках напряжения рассеяния, которые стремятся уменьшить пульсацию тока. Так как эти напряжения рассеяния действуют в обоих анодах в одном и том же направлении, то они не оказывают никакого влияния на момент перемены анодов, но зато сглаживают постоянный ток так же, как сглаживающая дроссельная катушка в цепи постоянного тока.

Как это видно из кривой силы тока, первичные и вторичные ампервитки на одном керне здесь взаимно не уравниваются. Следствием



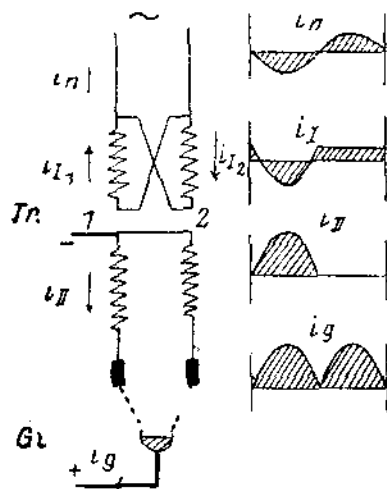
Фиг. 373. Пульсирующий магнитный поток от ярма к ярму.

этого является то, что потоки рассеяния вокруг обмоток здесь усиливаются и вызывают индуктивное падение напряжения большее, чем при нормальной нагрузке с синусоидальными токами.

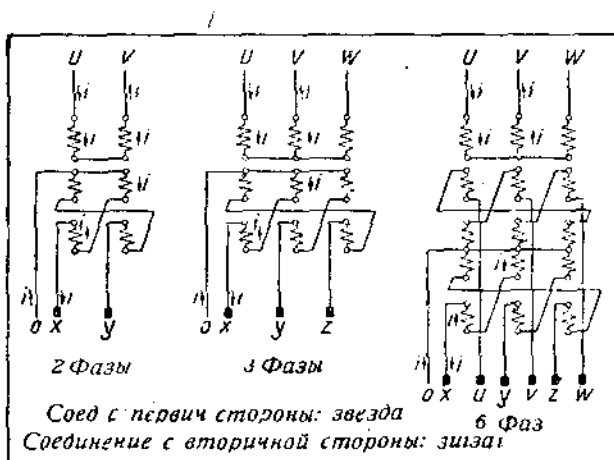
В. Условия нагрузки аналогичны, если соединить параллельно первичные обмотки обоих кернов (фиг. 374). Несмотря на то, что первичные обмотки при этом электрически не зависят друг от друга, в магнитном отношении мы будем иметь то же токораспределение. Здесь следует учитывать, что трансформатор не может трансформировать слагающие постоянного тока, так что при нагрузке вторичной обмотки пульсирующим постоянным током первичный ток должен получиться чистым переменным током. Из условия магнитного равновесия между кернами следует, что и через первичную обмотку вторично ненагруженного керна будет проходить ток. Оба первичных тока складываются в подводящих проводах в ту же кривую силы тока, что и раньше. От прежнего разницы будет заключаться лишь в том, что поток, возникший теперь от ярма к ярму, не будет изменяться с изменением пульсаций постоянного тока, а примет некоторое постоянное значение. Кроме дополнительного насыщения трансформатора, этот поток не окажет, следовательно, никакого влияния на условия нагрузки. Оба соединения А и В часто применяются специально для малых мощностей.

¹⁾ M. Schenkel. Siemens-Zeitschrift, 1925 S. 1 и 84.

С. Для некоторых целей, особенно при больших мощностях, описанные условия нагрузки нежелательны, так как поток рассеяния ярма при соответствующей силе может вызвать нарушение работы вблизи находящихся аппаратов. Кроме того, падение напряжения со стороны постоянного тока очень велико. Более благоприятные в этом отношении нагрузки трансформатора мы получим, если разделим вторичные обмотки на 2 половины и соединим их на-крест (фиг. 375). В этом случае под действием анодных токов в обоих кернах одновременно создаются потоки и вторичные ампер-витки выравниваются на каждом керне в отдельности первичными ампер-витками. Добавочный поток от ярма к яруму здесь пропадает. При соответствующем расположении обмоток рассеяние катушек может быть сделано относительно небольшим.



Фиг. 374. Однофазный трансформатор. Параллельное соединение.



Фиг. 375. Трансформатор с соединением в зигзаг, употребляемый для выпрямителей.

§ 17. Трехфазный трансформатор с тремя вторичными фазами.

Выпрямительные установки средней и большой мощностей присоединяются обычно к трехфазной сети через трехкernовый трансформатор. В зависимости от того, имеется ли у выпрямителя 3 или 6 анодов, трансформатор с вторичной стороны устраивается с 3 или 6 фазами. Рассмотрим сначала трехфазные соединения, применяемые в настоящее время для средних выпрямительных установок (20—150 амп.).

А. Соединение „звезда-звезда“ (фиг. 373).

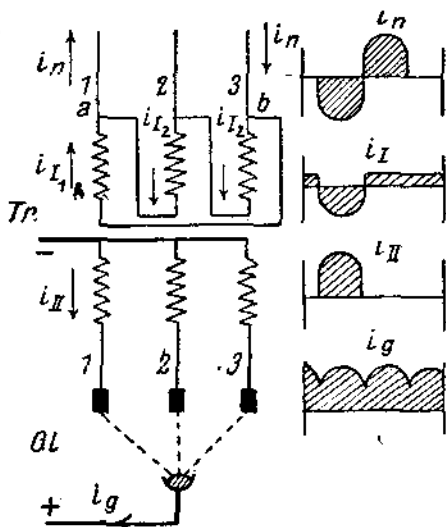
Все три вторичных напряжения сдвинуты здесь друг относительно друга на 120° . Аноды выпрямителя пропускают ток лишь в продолжение одной трети периода, а в остальное время не находятся под током. Условия нагрузки у трансформатора в принципе такие же, как и у рассмотренных ранее однофазных соединений. Анодный ток, проходящий с вторичной стороны, вызывает в том же керне первичный ток, который благодаря электрической сопряженности должен протекать и через первичные обмотки вторично ненагруженных фаз. Для первичного токораспределения действительно условие, при котором 3 керна находятся друг по отношению к другу в магнитном равновесии. Здесь также возникает пульсирующий поток рассеяния, проходящий в одном направлении через все керна и

замыкающийся через воздух от ярма к ярму. Для создания этого потока расходуется $\frac{1}{3}$ ампер-витков при вторичном токе. Поток и здесь сглаживает кривые постоянного тока и, как постоянный поток, не оказывает никакого действия на сдвиг фазы тока в питающей сети переменного тока ¹⁾. В этом отношении здесь, как и раньше при однофазном соединении, действует попросту рассеяние катушек, увеличившееся благодаря несимметричному распределению первичных и вторичных ампер-витков.

В. Соединение „треугольник-звезда“.

Если соединить первичные обмотки в треугольник вместо звезды, то при этом с первичной стороны будет уничтожена электрическая сопряженность.

Как видно из вышеприведенных рассуждений, через первичную обмотку будет тогда проходить ток, имеющий ту же форму кривой, что и вторичный ток, однако сдвинутый относительно нулевой линии на величину среднего значения (фиг. 376). Для какого-либо определенного момента времени, когда под нагрузкой находится, например, анод 1, мы будем иметь распределение, приведенное на фигуре. Ток в фазе 3, получаемый из сети и текущий к фазе 1, делится в точке *b* на две части. Одна часть, величина которой соответствует значению постоянного тока в аноде, проходит через первичные обмотки фаз 2 и 3. Этот ток имеет постоянную величину и вызывает остающееся постоянным насыщение в обоих кернах 2 и 3. Второй частичный ток идет непосредственно к фазе 1 и компенсирует вторичные ампер-витки до величины, необходимой для того, чтобы поток, оставшийся в кернах 1, сохранял магнитное равновесие с потоками остальных кернов. Таким образом здесь возникает, так же как и при соединении „звезда-звезда“, поток рассеяния от ярма к ярму, который однако, в отличие от упомянутого соединения, не изменяется с пульсациями тока и, следовательно, не оказывает сглаживающего действия.



Фиг. 376. Трехфазный трансформатор с тремя вторичными фазами. Первичное соединение — треугольник.

С. Соединение в „зигзаг“.

Если желательно избежать добавочного насыщения трансформатора от потока рассеяния при работе выпрямителей с тремя фазами, то вторичную обмотку следует соединить в зигзаг. С первичной стороны, при присоединении установки к относительно большим напряжениям, предпочитают соединение звездой ²⁾. В этом случае анодный ток возбуждает одновременно два керна и ампер-витки на каждом керна в отдельности компенсируются первичными токами. Благодаря меньшему рассеянию катушек это соединение дает менее падающую характеристику напряжения; соединение

¹⁾ Н. Nielsen ETZ. 42. 1185 1921.

²⁾ Звезду с первичной стороны предпочитают, главным образом, благодаря ее дешевизне, что объясняется меньшим числом витков в ней при тех же мощностях и напряжениях. Подробнее см. Видмар. Трансформатор в эксплуатации. Пер. под ред. Е. В. Нитусова, Гостехиздат, 1929.

в зигзаг имеет, однако, тот недостаток, что трансформатор должен быть взят несколько более мощным, чем при соединениях рассмотренных в А и В.

При соединении первичных обмоток в треугольник, что обычно принято для низких напряжений питающей сети, у трансформатора получаются аналогичные условия нагрузки. Необходимая мощность трансформатора теоретически будет та же, что и при соединении звездой.

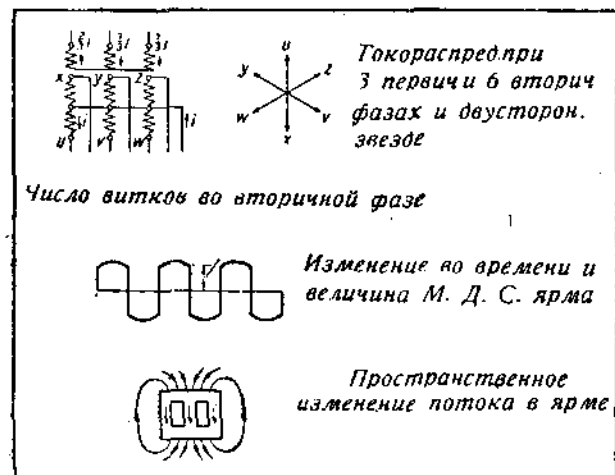
§ 18. Трехфазный трансформатор с шестью вторичными фазами.

В настоящее время мощные выпрямители всегда строятся с шестью фазами. С таким же числом фаз строятся и стеклянные выпрямители большой мощности. Главный трансформатор при этом выполняется с шестифазной вторичной обмоткой и с трехфазной первичной обмоткой, присоединяемой к трехфазной сети. При этом встречается несколько видов соединений трансформатора, в принципе отличных между собою.

А. Соединение „звезда-звезда“ (фиг. 377).

Если допустить, что ток проходит лишь через один анод, то получится то же токораспределение, что и при трехфазном соединении „звезда-звезда“. Благодаря электрической сопряженности с первичной стороны, все три ядра возбуждаются и возникает поток рассеяния, замыкающийся через воздух от яра к яру. Существенное отличие от трехфазного соединения заключается в том, что этот поток рассеяния меняет свое направление по мере перепрыгивания

дуго от одного анода (U) к другому (V). Таким образом мы здесь имеем дело с переменным потоком, изменяющимся с трехкратной частотой. Этот поток индуктирует напряжения в отдельных фазах и с своей стороны влияет на токораспределение в выпрямителе и трансформаторе. Так как индуктированные при этом напряжения действуют на фазы U , V и W в направлении, противоположном действию их на фазы X , Y и Z , то они выравнивают напряжения между анодами. При соответствующих значениях этих напряжений они вызы-



Фиг. 377. Трехфазный трансформатор с шестью вторичными фазами. Первичное распределение — звезда.

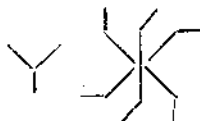
вают одновременное горение двух анодов. Поток рассеяния действует здесь аналогично так называемой отсасывающей дроссельной катушке, принцип действия которой будет описан ниже. Для случая одновременного горения двух анодов напряжение в цепи постоянного тока определяется, как среднее значение обоих действующих фазовых напряжений. Этим объясняется свойственное данному соединению сильное падение напряжения между небольшими нагрузками, когда горит лишь один анод, и сильными нагрузками, когда горят главным образом два анода. На практике такое падение напряжения сказывается вредно на работе. Поэтому описанное соединение применимо лишь при особом выполнении железного ядра.

В. Соединение „треугольник-звезда“.

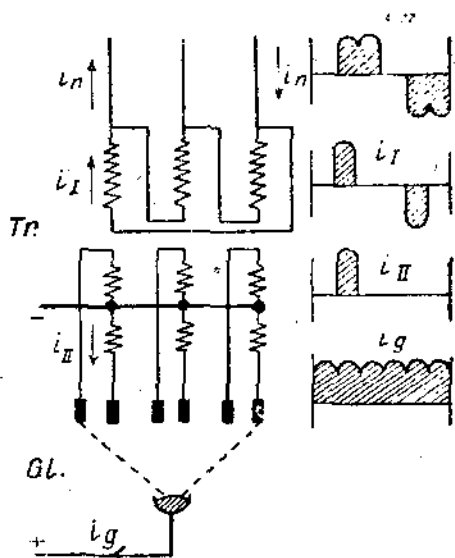
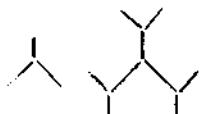
Если при вторичной шестифазной звезде соединить первичную обмотку в треугольник, то ампер-витки, создаваемые анодным током с вторичной стороны, будут уравниваться на том же керне. Условия рассеяния поэтому в данном соединении относительно благоприятны. Получаются формы кривой тока, представленные на фиг. 378. Это соединение часто применяется благодаря своей простоте.

С. Соединение в „зигзаг“.

Если при первичной звезде желательно получить работу без рассеяния, то необходимо вторичную обмотку каждого керна составлять из нескольких частичных обмоток различных фаз. Следует упомянуть здесь нормальное соединение в зигзаг



(фиг. 375), действующее аналогично трехфазному соединению в зигзаг. Воспринятый из сети ток имеет здесь ту же форму кривой, что и на фиг. 378. При этом соединении трансформатор оказывается несколько большим, так как для вторичной обмотки требуется много меди. Такое же токораспределение получается при более благоприятной нагрузке вторичной обмотки. Для этой же цели используют для двух фаз те части обмотки, которые сходятся в нулевой точке:

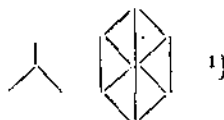


Фиг. 378. Трехфазный трансформатор с шестью вторичными фазами. Первичное соединение — треугольник.

Такое соединение вторичной обмотки применимо и при треугольнике с первичной стороны, так как здесь распределение нагрузки в трансформаторе благоприятнее, чем при соединении В.

Д. Соединение многоугольником.

Вместо соединения в зигзаг с вторичной стороны можно применить также сочетание из соединений звездой и многоугольником



что на практике осуществляется при первичной звезде. Здесь первичные и вторичные ампер-витки каждого керна взаимно уравниваются, так как анодный ток, распределяясь по различным параллельно соединенным

¹⁾ Германский патент 311870 (BBC).

обмоткам, может проходить по направлению, соответствующему первичному току. При этом наружные части вторичной обмотки нагружены значительно меньше, чем внутренние. Недостатком таких комбинированных обмоток является сложность их устройства и схемы соединений трансформатора.

§ 19. Типовая мощность трансформатора.

Как это видно из фиг. 372—378, токи нагрузки в обмотках трансформатора имеют самые разнообразные формы кривой, дающие при синусоидальных напряжениях соответствующие коэффициенты нагрузок. Отсюда получается для трансформатора большая кажущаяся мощность, чем та, которая соответствует мощности постоянного тока. Для определения этой кажущейся мощности, являющейся мерой при выборе типа трансформатора для заданной выпрямительной установки, следует рассматривать отдельно первичную и вторичную обмотки, так как при трансформации кривые тока всегда изменяются. По величине токов и напряжений определяют следовательно суммарную кажущуюся мощность для вторичной стороны и суммарную кажущуюся мощность для первичной стороны. Среднее из этих значений дает нам необходимую типовую мощность трансформатора. С целью сравнения отдельных соединений можно выразить потребную мощность трансформатора в процентах от мощности постоянного тока, которую мы примем за 100%. По этому принципу были определены мощности трансформаторов для описанных выше соединений, а результаты сведены в табл. 3 на фиг. 379.

§ 20. Дроссельная катушка.*

В выпрямительных установках дроссельные катушки применяются для различных целей, при этом речь идет о дросселях с железным сердечником, так как при той же мощности они дешевле „воздушных дросселей“.

Принцип действия дросселей при изменяющемся токе заключается в следующем.

Ток, проходящий по обмотке, создает в железе магнитный поток, изменяющийся пропорционально ампер-виткам возбуждения и с своей стороны индуктирующий в обмотке дроссельной катушки напряжение, стремящееся ослабить изменение силы тока. По индуктивности L заданной дроссельной катушки мы можем составить суждение о величине напряжения, индуктируемого в ней при определенном изменении тока. У железных дросселей величина L зависит, с одной стороны, от числа витков обмотки, а с другой стороны — от магнитных соотношений в железе керна.

Для того, чтобы получить величину индуктивного сопротивления (L_m) дроссельной катушки, через обмотку которой проходит переменный ток частоты f , необходимо умножить индуктивность L на угловую скорость $\omega = 2\pi f$. Действие дроссельной катушки в отличие от других сопротивлений в замкнутом контуре зависит не только от индуктивности L , но и от частоты переменного тока, т.-е. действие катушки пропорционально также и частоте.

Принцип действия дросселей, применяемых в выпрямительных установках, различен в зависимости от назначения этих дросселей. Главным образом следует указать на три случая применения катушки:

1. В качестве сглаживающей дроссельной катушки для сглаживания постоянного тока и напряжения.
2. В качестве анодной дроссельной катушки для создания определенного падения напряжения в цепи анодов.
3. В качестве отсасывающей дроссельной катушки для воздействия при многофазной работе на токораспределение в отдельных анодах с различными фазовыми напряжениями.

№	Число фаз		Соединение	Типовая мощность трансформатора в %
	первичн.	вторичн.		
1	1	2		148
2	1	2		148
3	1	2		154
4	3	3		136
5	3	3		136
6	3	3		148
7	3	3		148
8	3	3		127
9	3	6		155
10	3	6		157
11	3	6		142
12	3	6		142
13	3	6		144
14	3	6		127

С отсасыв дросселем

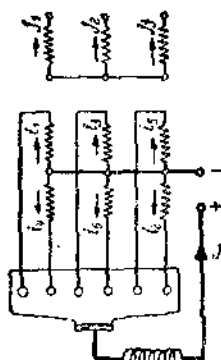
Фиг. 379. Таблица 3. Типовая мощность трансформаторов. Мощность постоянного тока $F_g \times I_g = 100\%$.

§ 21. Сглаживающая дроссельная катушка.

Как это следует из вышесказанного, напряжение постоянного тока, получаемое от выпрямителя, непостоянно, т.е. имеет определенные пульсации, которые наблюдаются и в постоянной силе тока в зависимости от рода нагрузки. На практике при работе выпрямителей часто требуется

ослаблять составляющую переменного тока в цепи постоянного тока. Такое ослабление особенно необходимо там, где благодаря незначительности числа фаз или работы на противодействующее напряжение относительно увеличивается естественная волнистость тока. Составляющая переменного тока особенно вредна при зарядке батарей, так как она вызывает добавочное нагревание, не принимая никакого участия в зарядке. Поэтому в установках со стеклянными выпрямителями, являющимися в большинстве случаев двухфазными или трехфазными, стали предусматривать дроссельные катушки в цепи постоянного тока. Последние давали возможность наиболее простым образом выравнивать постоянный ток.

В мощных выпрямительных установках, выполняемых в настоящее время большей частью с шестью фазами, вопрос о сглаживании возникает лишь там, где ток выпрямителя нарушает правильную работу телефонных сетей. Также и здесь сглаживание может быть осуществлено включением дроссельной катушки в цепь постоянного тока. Принципиальная схема выпрямителя со сглаживающей катушкой представлена на фиг. 380.



Фиг. 380. Сглаживающая дроссельная катушка в цепи постоянного тока.

Так как постоянный ток, составляется из отдельных следующих друг за другом анодных токов, то напряжение e , у зажимов дроссельной катушки будет действовать на все анодные токи в одном и том же направлении. Последняя не может поэтому вызвать никакого выравнивания напряжения между отдельными фазовыми напряжениями. Не изменяется, следовательно, и тот факт, что протекание тока осуществляется анодом, имеющим наибольшее напряжение. На распределение во времени токов в анодах наличие сглаживающей дроссельной катушки не оказывает никакого действия. Для того, чтобы показать влияние индуктивности L в цепи постоянного тока на форму кривой последнего, подсчитаем его величину, предполагая при этом чисто омическую нагрузку (R) в цепи постоянного тока и пренебрегая добавочными влияниями ¹⁾.

Для замкнутого контура тока мы имеем дифференциальное уравнение:

$$E_{\max} \sin \omega t - Ri_g - L \frac{di_g}{dt} = 0.$$

Решение уравнения дает для постоянного тока и напряжения:

$$i_g = \frac{E_{\max}}{\sqrt{R^2 + (L\omega)^2}} \sin(\omega t - \varphi) + Ce^{-\frac{R}{L\omega} \omega t},$$

$$e_g = i_g R.$$

Напряжение у зажимов дроссельной катушки будет равно

$$e_s = \frac{E_{\max} L \omega}{\sqrt{R^2 + (L\omega)^2}} \cos(\omega t - \varphi) - CRe^{-\frac{R}{L\omega} \omega t},$$

где

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L\omega}{R}.$$

¹⁾ См. также Н. Nielsen. ETZ. 41. 323, 1920.

Постоянная C определяется из начальных условий и для стационарного режима зависит, с одной стороны, от отношения:

$$\frac{L\omega}{R}$$

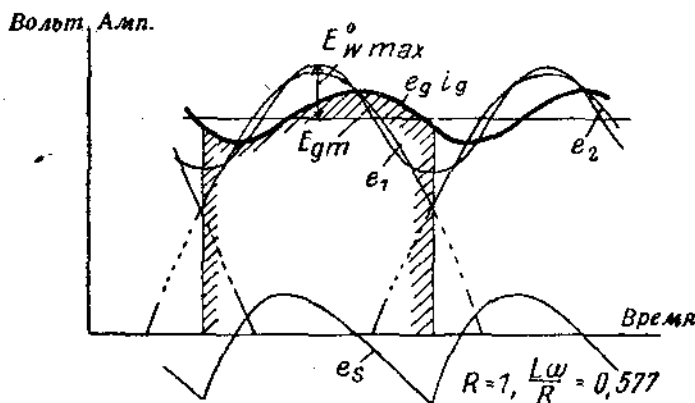
и с другой стороны от числа работающих фаз. Путем простого преобразования можно показать, что форма кривых, а тем самым и их волнистость зависят лишь от отношения индуктивности к омическому сопротивлению:

$$\frac{L\omega}{R}.$$

На фиг. 381 определена форма кривой для отношения:

$$\frac{L\omega}{R} = 0,577.$$

Определение результирующей волнистости по вышеприведенным формулам очень сложно; оно однако осуществимо при помощи более простого приближенного метода.



Фиг. 381. Формы кривых при применении сглаживающего дросселя.

Как это следует из фигуры, слагающая переменного тока имеет здесь значительно более синусоидальный характер, чем при работе без дроссельной катушки, так как гармоники с большим числом периодов благодаря их большей частоте сильнее дросселируются.

Слагающая переменного тока в напряжении постоянного тока может поэтому быть заменена ее основной волной. При холостом ходе мы имеем тогда для напряжения постоянного тока:

$$e_g = E_{gm} + e_w^0.$$

В этом случае при нагрузке, состоящей из омического и индуктивного сопротивления, среднее значение постоянного тока J_{gm} будет зависеть исключительно от сопротивления R , тогда как напряжение e_w^0 будет зависеть от сопротивления переменному току.

Отсюда мы получаем для постоянного тока:

$$i_g = \frac{E_{gm}}{R} + \frac{e_w^0}{\sqrt{R^2 + (L\omega)^2}},$$

где ω' — угловая скорость основной волны составляющей переменного тока; эта угловая скорость при числе фаз n равна n -кратному значению угловой скорости питающей сети:

$$\omega' = n\omega.$$

При определении действующей индуктивности L по данным дроссельной катушки необходимо обратить внимание на то обстоятельство, что железо ее керны насыщается также и под действием проходящего через нее постоянного тока. Это насыщение должно быть ослаблено до известной величины путем устройства воздушного зазора по пути силовых линий в железе, для того, чтобы по возможности увеличить значение L . Простой графический метод для определения наиболее благоприятного воздушного зазора предложен Ф лей ш м а н н о м (Fleischmann).

§ 22. Анодные дроссели.

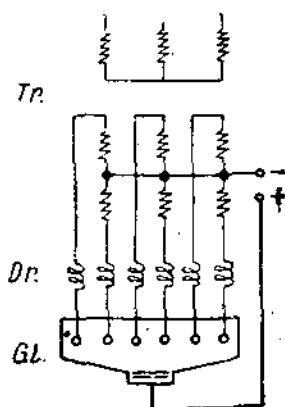
На практике дроссельная катушка в цепи анодов (фиг. 382) применяется главным образом в двух случаях. Во-первых, в том случае, когда желательно иметь сильно падающую характеристику при нагрузке выпрямителя, как, например, при автоматической зарядке батарей; во-вторых, в случае, если желательно соединять для параллельной работы аноды с одинаковыми напряжениями для того, чтобы по ним проходил одинаковый ток. В последнем случае речь идет о том, чтобы в каждую анодную

цепь ввести добавочное сопротивление, выравнивающее отрицательную характеристику дуги. Так как характеристика выравнивается всего лишь на несколько вольт, то параллельные дроссели получаются относительно небольшими. Аналогично дроссельной катушке в цепи анода действует всегда и нормальное рассеяние катушек в главном трансформаторе установки. В трансформаторах для выпрямителей это рассеяние соответствует напряжению рассеяния в 3—6% от главного напряжения.

Индуктивность в контуре тока действует так, что после зажигания анодный ток возрастает слабее, чем это соответствовало бы напряжению, иначе говоря, отстает от последнего по фазе. Со стороны постоянно тока в каждый момент действует разность между фазовым напряжением и напряжением дроссельной катушки горящего анода.

Фиг. 382. Анодные дроссельные катушки.

В тот момент, когда убывающее напряжение горящего анода достигает того же значения, что и возрастающее напряжение следующей фазы, через последнюю начинает проходить ток. Так как вновь загоревшийся анод воспринимает нагрузку лишь постепенно, то во время перемены анодов горят одновременно 2 анода, в которых под действием напряжений в дросселях будет поддерживаться одинаковый потенциал относительно катода. Лишь после затухания первого анода второй воспринимает на себя весь постоянный ток. Время одновременного горения 2 анодов, а также и момент возникновения и исчезновения тока в анодах зависят в сильной мере от величины действующей индуктивности.



В дальнейшем мы снова займемся расчетом формы кривой постоянного тока и анодного тока для трехфазной работы при чисто омической нагрузке со стороны постоянного тока, при чем попрежнему будем пренебрегать добавочными влияниями. Для части периода, когда горит лишь один анод, мы имеем, как и раньше:

$$e_1 - Ri_g - L \frac{di_g}{dt} = 0$$

и

$$i_g = \frac{E_{\max}}{\sqrt{R^2 + (L \cdot \omega)^2}} \sin(\omega t - \varphi) + C_1 \cdot e^{-\frac{R}{L\omega} \omega t},$$

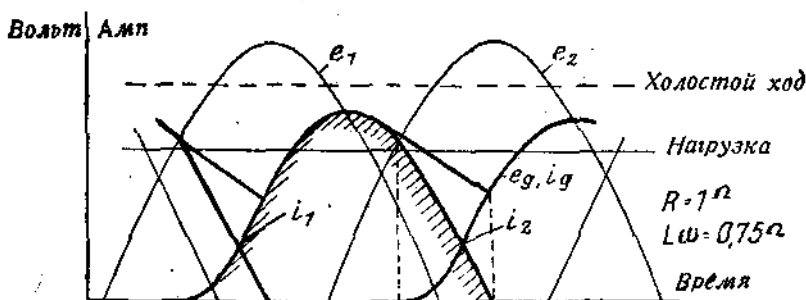
где

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L\omega}{R}.$$

Для той части периода, когда горят одновременно два анода, действительны следующие дифференциальные уравнения:

$$e_1 - (i_1 + i_2) R - L \frac{di_1}{dt} = 0,$$

$$e_2 - (i_1 + i_2) R - L \frac{di_2}{dt} = 0.$$



Фиг. 383. Формы кривых при наличии индуктивности в цепи анода.

Для работы с тремя фазами получаются следующие решения:

$$i_1 + i_2 = i_g = \frac{E_{\max}}{\sqrt{4R^2 + (L \cdot \omega)^2}} \sin(\omega t - \varphi' - 60) + C_2 \cdot e^{-\frac{2R}{L\omega} \omega t},$$

$$i_1 - i_2 = \frac{\sqrt{3} E_{\max}}{L\omega} \sin(\omega t - 60) + C_3$$

Для стационарного режима постоянные определяются из переходных условий.

При заданных условиях нагрузки формы кривой зависят также и здесь от отношения индуктивного к омическому сопротивлению. Чем больше это отношение, тем больше сдвиг фазы анодного тока и тем больше падение напряжения со стороны постоянного тока. На фиг. 383 представлена кривая тока для $\frac{L \cdot \omega}{R} = 0,75$.

Число одновременно горящих анодов будет тем больше, чем меньше омическое сопротивление в цепи постоянного тока. В шестифазном выпрямителе при работе очень часто загораются одновременно три анода. При коротком замыкании со стороны постоянного тока, когда сопротивление R

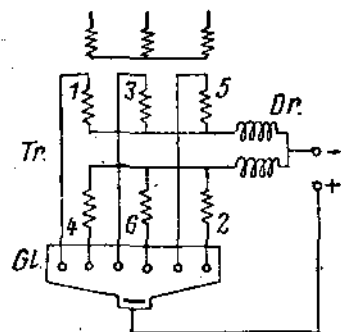
можно принять равным нулю, в проведении тока одновременно участвуют практически все аноды. Этот случай наступает, например, при коротком замыкании выпрямителя с пониженным напряжением. Он имеет громадное значение для определения максимального тока короткого замыкания установки ¹⁾.

При расчете предполагалось, что дроссельные катушки отдельных анодных цепей магнитно не связаны. Сцеплением дросселей можно при известных обстоятельствах значительно усилить их действие. При дросселях, включаемых для параллельной работы, лучше всего сцеплять фазы так, чтобы параллельно работающие аноды намагничивали один и тот же железный керн в противоположных направлениях ²⁾. Нежелательное падение напряжения со стороны постоянного тока этим самым сводится к минимуму.

При включении дросселей с первичной стороны трансформатора результаты получаются такие же, как и при анодных дросселях.

§ 23. Отсасывающая дроссельная катушка.

При большом числе фаз выпрямителя, когда в продолжение целого периода под напряжением находится несколько анодов, можно включением дроссельной катушки достигнуть равномерного распределения тока по нескольким анодам. Эту распределяющую ток дроссельную катушку, называемую обычно „отсасывающей дроссельной катушкой“, с целью ослабления у них нагрузки в меди лучше всего включить в нулевую точку главного трансформатора. В принципе решение вопроса сводится к разделению многофазной системы на отдельные частичные системы, из которых каждая соединена в звезду. Эти частичные системы соединяются между собою через дроссельную катушку ³⁾.



Фиг. 384. Отсасывающая дроссельная катушка.

В дальнейшем мы рассмотрим соединение, чаще всего встречающееся на практике, а именно шестифазное соединение с отсасывающей дроссельной катушкой. Это соединение можно обычно получить, если на кернах двух сердечников (I и II) часть фаз, а именно 1, 3 и 5, монтировать звездой в одном направлении, а другие фазы 2, 4 и 6 монтировать звездой в другом направлении (фиг. 384). Если принять, что при таком соединении зажигание выпрямителя произойдет, например, в тот момент, когда анод 1 имеет максимальное положительное напряжение, то при включении через анод 1 пойдет ток. Этот ток создает в дроссельной катушке некоторый возрастающий поток. Последний индуцирует в обмотке 1 напряжение, препятствующее внезапному нарастанию тока в аноде 1, а в обмотке 2 индуцирует напряжение, благоприятствующее зажиганию анода 2.

Если эти напряжения достаточно велики, то токи через оба анода начнут проходить почти одновременно.

Для удобства расчета пренебрежем всякими добавочными влияниями и предположим, что включена безиндукционная нагрузка R . Индуктив-

¹⁾ W. Dällenbach и E. Gerecke. Arch. f. Elektrot. 14. 171, 1924.

²⁾ Германский патент 238 754 (AEG).

³⁾ Германский патент 309 593 (BBC).

ность дроссельной катушки снова обозначим через L . Для обоих одновременно горящих анодов 1 и 2 применимы тогда дифференциальные уравнения:

$$e_1 - (i_1 + i_2)R - L \frac{di_1}{dt} + L \frac{di_2}{dt} = 0$$

$$e_2 - (i_1 + i_2)R - L \frac{di_2}{dt} + L \frac{di_1}{dt} = 0.$$

Для постоянного тока и напряжения мы имеем решения

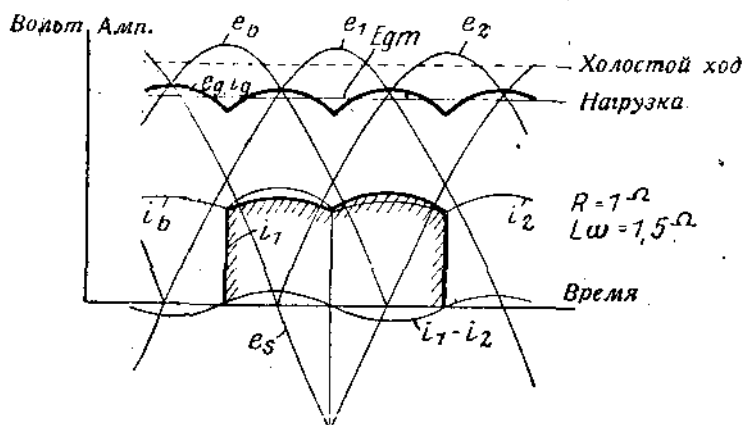
$$i_1 + i_2 = i_g = \frac{e_1 + e_2}{2R} = \frac{\sqrt{3} E_{\max}}{2R} \sin(\omega t - 30^\circ).$$

$$e_g = \frac{e_1 + e_2}{2}.$$

Для разности анодных токов получается

$$i_1 - i_2 = \frac{E_{\max}}{2L\omega} \sin(\omega t - 30^\circ) + C.$$

Получаемые отсюда формы кривой представлены на фиг. 385. Выравнивание между напряжениями обоих анодов, имеющих при одновременном горении одинаковый потенциал относительно катода, осуществляется при помощи напряжения, возникающего на зажимах дроссельной катушки. В тот момент, когда напряжение анода 3 становится больше напряжения горящего анода 1, дуга у последнего потухает и, благодаря благоприятному



Фиг. 385. Формы кривых при применении отсасывающего дросселя.

распределению напряжения в дроссельной катушке, переходит к аноду 3. Аналогично этому осуществляется перемена анодов и в другой части системы. Для стационарного режима можно принять одинаковыми средние нагрузки обоих частей системы. При таком токораспределении ампер-витки постоянного тока на обоих ядрах дроссельной катушки имеют одно и то же направление и насыщают ее железо. В дроссельной катушке возникает переменный поток, частота которого равна тройной частоте трехфазной системы. Этот поток индуцирует в обмотках вышеупомянутые выравнивающие напряжения. В противоположность описанным выше нормальным соединениям, анодный ток достигает здесь лишь до половины значения, так как обе части системы принимают одинаковое участие в токораспределении и расходуют в два раза больше времени для нагрузки вто-

ричной обмотки трансформатора. Этим самым эффективное значение анодного тока при одинаковых средних значениях сильно понижается. Мощность трансформатора может быть взята меньшей. На практике громадный интерес представляет собою действие отсасывающей дроссельной катушки на напряжение постоянного тока. Так как происходит одновременное горение двух анодов с различными напряжениями, то в цепи постоянного тока действует среднее значение обоих напряжений, которое приблизительно на 13% меньше, чем при нормальном шестифазном соединении ¹⁾. Таким образом, между холостым ходом выпрямителя, когда дроссельная катушка бездействует, и между критической нагрузкой, когда она начинает действовать, наблюдается падение напряжения приблизительно в 13%. Падение же напряжения между критической и полной нагрузками, благодаря меньшему максимальному значению анодного тока, будет, напротив, относительно мало. Благодаря таким условиям нагрузки, коэффициенты, приведенные в § 10, для описанного соединения изменяются следующим образом:

$$C_1=0,855; \quad C_2=0,29.$$

Вытекающая отсюда типовая мощность трансформатора дана на фиг. 379, таблица 3.

§ 24. Стекланный выпрямитель.

Баллон стеклянного ртутного выпрямителя состоит в основном из грушевидного главного сосуда, верхняя, широкая часть которого служит для конденсации ртутных паров. К нижней, узкой части припаяны анодные рукава. Величина главного сосуда зависит в основном от желательного тока нагрузки, тогда как при конструктивном выполнении анодных рукавов должно быть принято во внимание и рабочее напряжение. У баллонов для низких напряжений (до 115 вольт) получаются короткие прямые рукава; для больших напряжений, во избежание обратного зажигания, рукава приходится выполнять с одним или двумя коленами. В этом отношении особенно хорошо оправдала себя конструкция (Сименс-Шуккерт), в которой нижние части рукавов несколько выступают в колене относительно места припоя верхних частей ²⁾. В настоящее время во всех баллонах имеются два небольших анода возбуждения для получения вспомогательной дуги (независимо от главного напряжения). Последняя получается под напряжением в 40—60 вольт и около 5 ампер. Зажигание в стекляннх выпрямителях достигается тем, что баллон, в нижней части которого находится ртуть, выводится из своего спокойного положения. Ртуть катода приходит при этом в кратковременное соприкосновение с зажигающим анодом, благодаря чему образуется искра, необходимая для зажигания.

В качестве анода для зажигания применяется или небольшая трубка с ртутью, находящаяся вблизи катода, или же твердый графитовый анод, погружающийся в ртуть при нагибании выпрямителя и могущий быть использованным также и в качестве анода возбуждения (AEG). Ток подводится к катоду при помощи одного или нескольких патрубков, расположенных или в самом глубоком месте баллона под поверхностью ртути, или же над поверхностью последней в особо насаженной трубке, электрически соединенной со ртутью.

В качестве электродов впаиваются гладкие стержни. В местах соприкосновения со стеклом к последним припаиваются трубки из материала, имеющего почти тот же коэффициент расширения, что и стекло. Такой

¹⁾ H. Giroz. *Revue générale de l'électr.* 1925, p. 253 и 303.

²⁾ Патент заявлен в Германии.

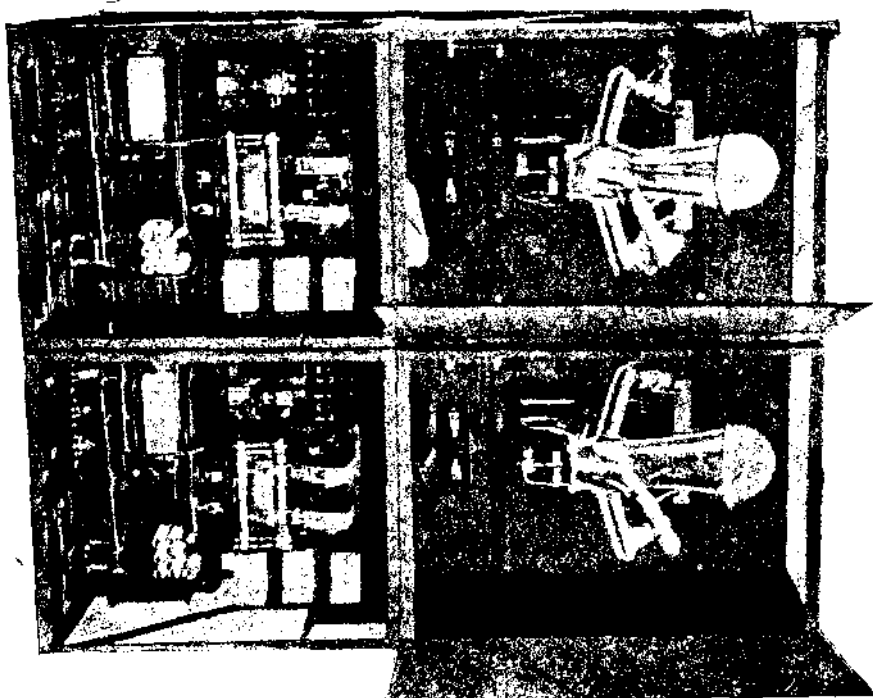
метод впайки приобрел права гражданства, благодаря простоте и удобству его выполнения. Для больших токов применяется, кроме того, впайка особого, нечувствительного к высокому нагреву колпачка. При этом способе в стеклянную трубку вплавляется тонкий край небольшого металлического колпачка. Ток подводится через основание колпачка, у которого с внутренней стороны прикреплен стержень анода, а с наружной стороны — подводящий ток провод. В стеклянных выпрямителях аноды состоят большей частью из графита и имеют при больших силах тока звездообразное поперечное сечение, с одной стороны, для увеличения излучающей поверхности, а с другой стороны, для уменьшения веса. Все электроды имеют снаружи



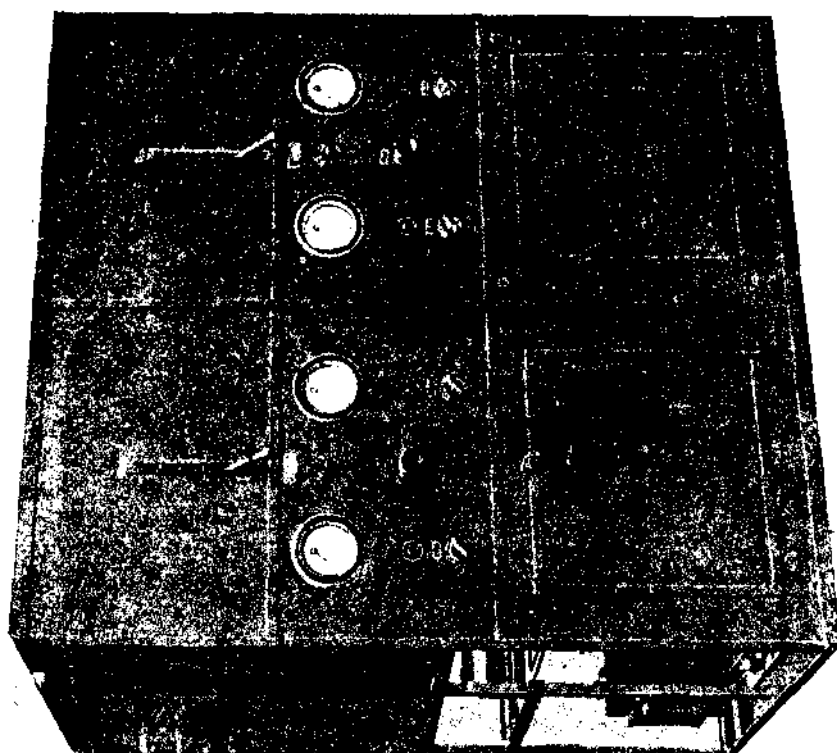
Фиг. 386. Стеклянный ртутный выпрямитель на 300 амп., 440 вольт.

защитные колпачки из жести, которые одновременно служат для прикрепления токоподводящих проводов. На фиг. 386 представлен мощный выпрямитель фирмы Сименс-Шуккерт на 300 амп., 440 вольт с 6 рукавами и раздвоенным патрубком катода.

Для того, чтобы в больших установках, на месте работы, избежать необходимости сборки многочисленных вспомогательных приборов, употребляемых при эксплуатации стеклянного выпрямителя, их монтируют заранее в одном общем железном каркасе и в таком готовом виде их рассылают покупателям. Устройство и схема установки зависят от ее назначения и желательных особенностей в эксплуатации. Существенную часть установки представляет устройство для регулировки напряжения, особенно необходимое при зарядке батарей или при работе на осветительную и



Фиг. 388. Автоматическая установка с стеклянными выпрямителями 2×150 амп. Камеры открыты.

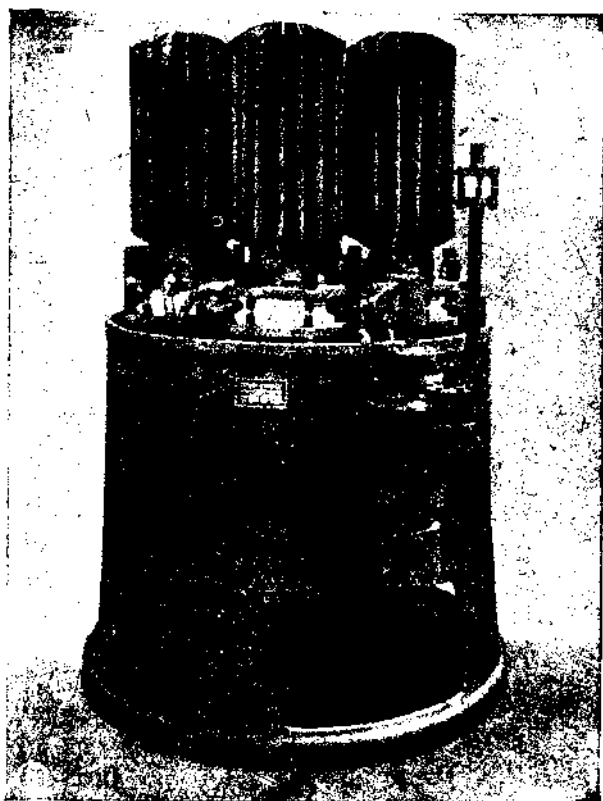


Фиг. 387. Автоматическая установка с стеклянными выпрямителями 2×150 амп. Вид спереди.

силовую сеть. В больших установках выше 100 амп. рекомендуется производить нагибание стеклянного сосуда не от руки, а автоматически при помощи электромагнитного привода. Кроме того, при наличии нескольких параллельно работающих ячеек можно выполнить схему так, чтобы в зависимости от нагрузки могли быть включены или выключены отдельные ячейки. При таком устройстве необходимость обслуживания установки сводится к минимуму. На фиг. 387 представлен вид со стороны щита у такой установки с автоматическим включением и выключением для 2×150 амп. На фиг. 388 показана задняя сторона при открытых ячейках с баллонами (конструкция Сименс-Шуккерт, Берлин).

§ 25. Мощный ртутный выпрямитель.

Существуют два типа железных вакуумных сосудов мощного ртутного выпрямителя. Один из этих типов состоит в основном из цилиндрического сосуда со съемной крышкой, уплотняемой по всей ее окружности. В крышке изолированно укреплены главные аноды, так же как и устройство для за-

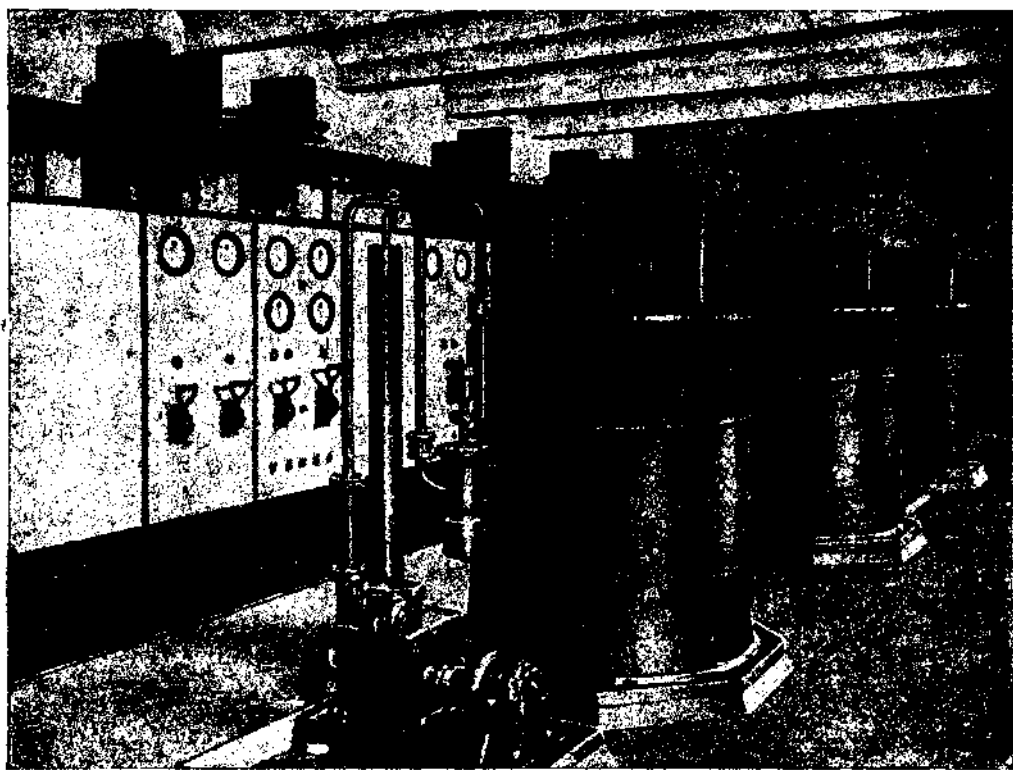


Фиг. 389. Мощный выпрямитель на 1000 амп.

жигания и возбуждения. Второй конструктивный тип состоит из закрытого котла, сваренного из толстой жести. К нему приварены патрубки, в которых укреплены аноды. Катод здесь большей частью прикрепляется к основанию сосуда. Катод хорошо изолирован от сосуда и легко от него открепляется. В качестве материала для анодов применяется железо, а в последнее время также и графит. На конструктивное выполнение отдельных деталей

отличающихся друг от друга и различных фирм, мы здесь подробно останавливаться не будем. И внешний вид различных конструкций выпрямителей большой мощности не одинаков. На фиг. 389 представлен мощный выпрямитель фирмы Сименс-Шуккерт для 1000 амп. с чугунной подставкой. На фиг. 390 последняя видна под выпрямителем. Подводка к анодам и к вспомогательной цепи проложены внутри чугунной подставки и совершенно незаметна снаружи.

Подробности о таких установках можно найти в многочисленных статьях о ртутных выпрямителях большой мощности ¹⁾.



Фиг. 390. Мощная выпрямительная установка.

В. Другие виды электрических выпрямителей ²⁾.

§ 26. Аргонный выпрямитель ³⁾.

В дальнейшем мы опишем вкратце также и выпрямители, отличающиеся по принципу действия от ртутных выпрямителей и пригодные, благодаря своим особым свойствам, для работы при известных условиях нагрузки.

Нормальному ртутному выпрямителю аналогичен так называемый аргонный выпрямитель, построенный фирмой „Германская телефонная и кабельная промышленность, Акцион. Об-во, Берлин“ (Deutsche Telefonverke u. Kabel-industrie A.-G., Berlin).

¹⁾ В. В. С. Mitteilungen. 1919, S. 248; 1925, S. 244; A. E. G. Mitteilungen. 1924 S. 53; Siemens-Zeitschrift 1921 S. 271; ETZ, 1918 S. 414., 1925 S. 1253; Elektro-journal, 1923.

²⁾ См. также A. Günter-Schultze. Elektr. Gleichrichter u. Ventile.

³⁾ ETZ, 1922 S. 921; F. H. Hellmuth ETZ, 1924 S. 579.

Введением небольшого количества щелочи в ртуть катода и заполнением сосуда аргоном здесь достигнута возможность значительно более легкого зажигания выпрямителя. Дуга может зажигаться без нагибания сосуда, для чего достаточно к вспомогательному аноду приложить напряжение около 600 вольт. Она поддерживается без вспомогательного возбуждения даже при относительно малых токах нагрузки приблизительно в 0,3 амп. Падение напряжения в сосуде составляет, как у маломощных ртутных выпрямителей, около 15 вольт. Аргонный выпрямитель строится для токов от 3—250 амп. при напряжении до 700 вольт. Главная область их применения там, где нужны напряжения до 100 вольт и небольшие мощности, так как в этих случаях ртутные выпрямители неэкономичны благодаря потерям при вспомогательном возбуждении.

§ 27. Выпрямитель с раскаленным катодом.

У этих выпрямителей необходимая электронная эмиссия катода достигается нагреванием его до определенной температуры. Ток, нагревающий катод, должен быть подведен извне. На практике применяются три различных вида раскаленных катодов:

1. Катод Венельта (Wenigert) — изобретатель этого катода), состоящий из слоя окислов щелочно-земельных металлов, нанесенных на нагреваемом иридиевом листе.

2. Чисто вольфрамовый катод в соединении с аргоном, заполняющим сосуд.

3. Чисто вольфрамовый катод с высоким вакуумом разрядного пространства, применяемый для кенотронов высокого напряжения.

Выпрямители Венельта изготавливаются фирмой AFA Берлин в двух конструкциях. Одна — для низкого напряжения до 110 вольт, а другая — для высокого напряжения в несколько тысяч вольт. Трубка для низкого напряжения заполнена аргоном, давлением в несколько миллиметров и строится для токов до 20 амп. Время горения составляет около 800 часов. Ограниченность времени горения объясняется распылением слоя окислов на катоде и исчезновением заполняющего газа. Конструкция, предназначенная для высокого напряжения, обладает 2 и 3 рукавами, насаженными на сосуде для предохранения от обратных зажиганий. Стекланный сосуд наполняется здесь газом неоном под незначительным давлением. В обоих типах аноды состоят из чистого железа. Падение напряжения составляет 17—30 вольт.

Другим типом выпрямителя с катодом накала является вольфрамовый выпрямитель, носящий в продаже различные названия (Tungar, Ramar, Rectigon) и применяемый в Америке специально для зарядки автомобильных и радио-батарей. Выпрямление осуществляется здесь в стекляннной груше, наполненной аргоном под несколькими сантиметрами давления. Катод накала изготовлен из вольфрама, а анод из — графита ¹⁾.

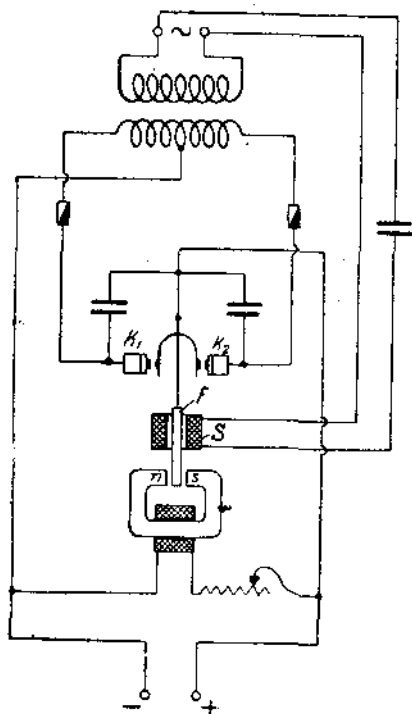
Совершенно другую область применения имеет вентильная трубка высокого напряжения с катодом накала из вольфрама. Она состоит из больших стеклянных трубок, эвакуированных до максимально возможных пределов. В качестве катода накала служит вольфрамовая нить, нагреваемая вспомогательным током и выбрасывающая при белом калении относительно небольшое число электронов. В качестве анода служит круглый диск из жести, находящийся на некотором расстоянии от катода. Благодаря чрезвычайно высокому вакууму, пробивающее напряжение, а тем самым и

¹⁾ Rectigon-Gleichrichter. ETZ, 1925. S. 1730.

падение напряжения в трубке очень велико. Достижимый ток относительно мал. Удастся изготовить трубки для 100 000 вольт и 50 миллиампер. В настоящее время они очень часто применяются вместо механических выпрямителей высокого напряжения в рентгеновских установках.

§ 28. Газовые выпрямители.

Для зарядки небольших батарей с небольшой силой тока до 0,2 ампер часто применяют ради простоты и дешевизны так называемый газовый выпрямитель. Последний состоит из стеклянной груши, укрепленной в обыкновенном ламповом цоколе. В качестве катода он имеет большой цилиндр из жести, а в качестве анода — тонкий железный провод, расположенный по середине катода. Действующей частью анода является лишь небольшая часть провода, остальная же часть защищена фарфором. Разрядное пространство заполнено смесью из благородных газов (гелия и неона). Включение производится непосредственно в сеть переменного тока, что дает возможность избежать расходов на трансформаторы и дроссели. Плохой коэффициент полезного действия этого выпрямителя окупается его дешевизной.



Фиг. 390-а.

§ 29. Электролитические выпрямители.

Электролитические выпрямители очень часто применяются благодаря их простоте и дешевизне для зарядки небольших батарей (до 15 вольт и 1 ампер постоянного тока).

Вентильное действие получается тогда, когда два различных металлических электрода, к которым приложено напряжение переменного тока, погружены в какой-либо водный раствор кислот или солей. На практике, главным образом, применяются два типа: железо и алюминий в растворе углекислого аммония и железо и свинец в серной кислоте.

§ 30. Механические выпрямители ¹⁾.

Обращает на себя внимание все возрастающая мощность механических выпрямителей, принцип действия которых состоит в следующем.

Якорь F (фиг. 390-а) поляризуется переменным током, протекающим по катушке S , и притягивается полюсами n и s электромагнита или постоянного магнита. Вследствие этого якорек F касается в такт с пульсациями переменного тока контактов K_1 и K_2 и выпрямляет ток, как видно из схемы.

Отход якорька F от контактов K должен совершаться в момент, когда мгновенное значение переменного тока $i=0$, во избежание образования

¹⁾ Этот параграф добавлен в русском издании инж. Е. В. Нитусовым.

вольтовой дуги. Поэтому в цепи выпрямленного тока недопустимо применение какой-либо индуктивности и выпрямленный ток имеет волнистую форму.

Инерция якорька F создает сдвиг фаз между его колебаниями и переменным током. Для компенсации этого сдвига включают последовательно с катушкой S некоторую емкость.

Такие выпрямители могут употребляться в последовательном и параллельном соединении.

Выпрямители строятся для зарядки аккумуляторных батарей на силу тока до 500 ампер.

IV. Электрические станции.

Дипл. инж. Зессингхаус ¹⁾).

А. Общие замечания.

1. Руководящие соображения при построении электрических станций.

Основные понятия.

Электрические станции для питания энергией осветительных и силовых сетей общественного пользования выполняются на основании других соображений сравнительно с электрическими станциями для промышленных установок. В то время, как у первых при сжижении пара в конденсационной установке возможно получить термодинамический коэффициент полезного действия лишь около 20%, при одновременном использовании пара для силовых и нагревательных целей достигается использование теплотворной способности топлива приблизительно до 70%.

Глава об электрических станциях содержит описание лишь важнейшего электрического оборудования, оставляя без внимания механическую часть.

Оборудование (электрическое) станции сообразуется с родом тока, напряжением и мощностью.

Нагрузка станции определяется потреблением энергии и эксплуатационными особенностями отдельных потребителей; при этом следует обратить внимание на то, что максимальное потребление энергии составляет лишь часть величины приключенной мощности и максимумы нагрузок отдельных потребителей не совпадают между собою по времени, так что наибольшая мощность, на которую должна быть рассчитана станция, меньше, нежели сумма всех отдельных максимальных нагрузок потребителей.

Нагрузка, в зависимости от цели использования, бывает более или менее колеблющейся и тем благоприятнее, чем ровнее кривая нагрузки, так как тогда приводные машины нагружаются более равномерно и их рабочие мощности более приближаются к нормальным.

Представление о характере изменения нагрузки или, соответственно, об использовании установки, дают следующие его отношения, которые относятся к определенному периоду времени (год), при чем в качестве наибольших значений нагрузки для потребителя или, соответственно для станции, должны быть введены те, которые вообще имеют место в рассматриваемом периоде времени.

¹⁾ Перевод этой главы выполнен инж. Б. М. Тареевым.

Коэффициент использования

$$= \frac{\text{полезно отданные киловаттчасы в год}}{\text{мощность приводимых машин в киловаттах} \times 8760 \text{ часов}} \%$$

Продолжительность использования

$$= \frac{\text{полезно отданные киловаттчасы в год}}{\text{мощность приводимых машин в киловаттах}} \text{ часов}$$

Коэффициент нагрузки

$$= \frac{\text{полезно отданные киловаттчасы в год}}{\text{максим. нагрузка станции в киловаттах в течение года} \times 8760 \text{ час.}} \%$$

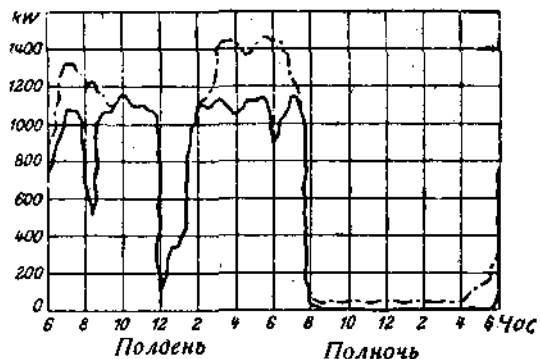
Приведенная длительность нагрузки

$$= \frac{\text{полезно отданные киловаттчасы в год}}{\text{максим. нагрузка станции в киловаттах в течение года}} \text{ часов.}$$

II. Кривые нагрузки.

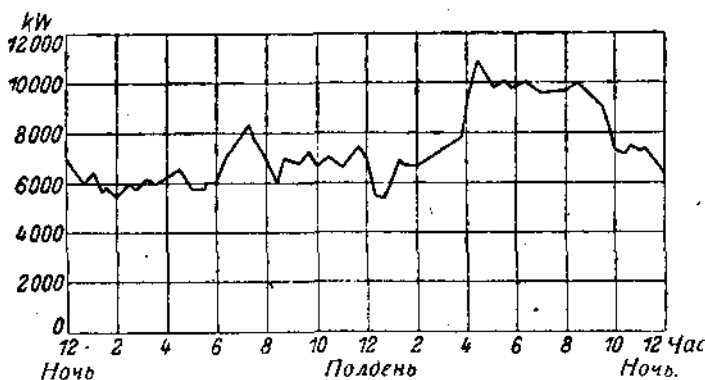
Кривые нагрузки электрических станций имеют вид, явно различный при различных целях применения энергии, но для тех станций, которые обслуживают потребителей одного рода, кривые получаются схожими.

1. Для промышленных электрических станций (фиг. 391) с исключительным или преобладающим приключением силовых потребителей дневная кривая нагрузки протекает без выступающего пикового значения, несмотря на сильные толчки тока, возникающие по отношению к среднему значению нагрузки (привод прокатных станков, подъемных устройств). Кривая нагрузки может быть также очень устойчивой и приближаться к горизонтальной прямой, как при текстильных фабриках и питании электро-химических производств.



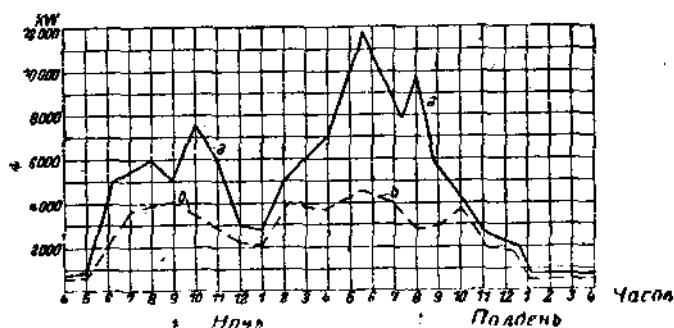
Фиг. 391. Характерные кривые нагрузки промышленной электрической станции.

2. Железнодорожные электрические станции (трамвай, метрополитен, пригородные дороги) обнаруживают плавно протекающие кривые нагрузки, имеющие, как правило, выдающийся пик нагрузки в определенные часы перед или после полудня (фиг. 392).

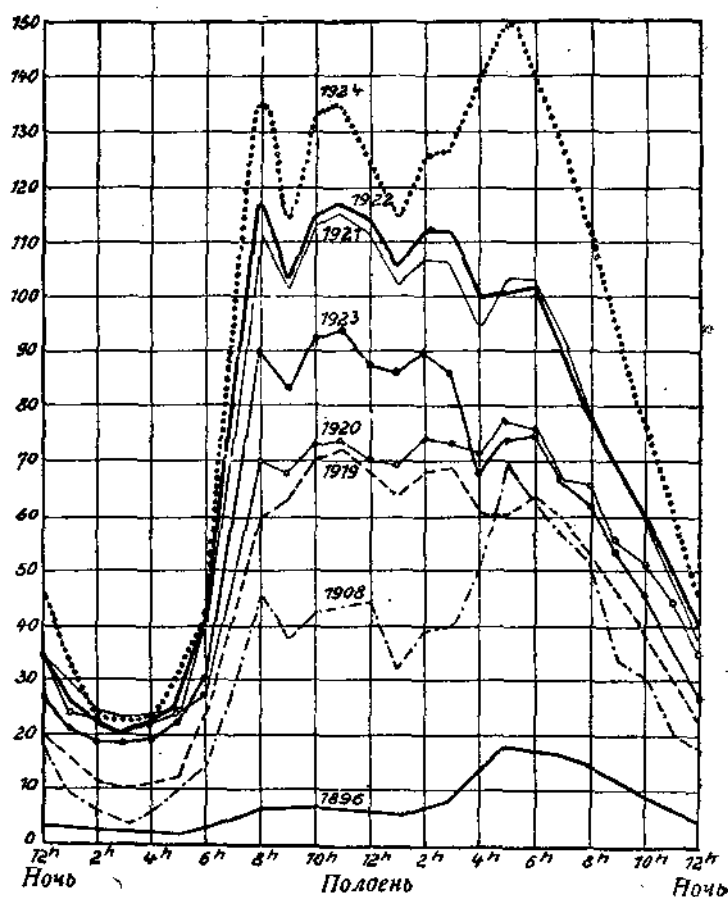


Фиг. 392. Характерные кривые нагрузки железнодорожной электрической станции.

3. Городские электрические станции. Дневная кривая нагрузки характеризуется пиком между 4 и 7 часами вечера зимой и соответственно между 6 и 8 часами летом.



Фиг. 393. Характерные кривые нагрузки городской электрической станции.



Фиг. 394. Средняя дневная кривая нагрузки города Берлина для ноября.

Пик нагрузки выступает тем отчетливее, чем выше процент приключенной осветительной нагрузки, в то время как приключение силовых установок и питание железных дорог делает кривую более ровной (фиг. 393 и 394).

III. Напряжения и числа периодов.

В качестве нормальных рабочих напряжений для электрических установок имеют силу следующие значения, при чем напечатанные жирным шрифтом напряжения рекомендуются в первую очередь как для новых установок, так и для значительных расширений:

1. Постоянный ток.

Вольт:

110 —	Нормально для всех случаев.
220 —	" " " "
440 —	" " " "
550 —	Только для железных дорог и подъемников.
750 —	" " " "
1 100 —	" " " "

2. Трехфазный ток 50 пер./сек.

125 —	Только для новых установок, если применено 220 вольт, имеет значительные недостатки.
220 —	Нормально для всех случаев.
380 —	" " " "
500 —	Для новых установок только при таких промышленных предприятиях, где применение 380 вольт исключается большими подъемниками.
3 000 —	Для новых установок только при таких промышленных предприятиях, в которых применение 6000 вольт имеет значительные недостатки.
5 000 —	Для новых установок только в тех случаях, когда вероятно присоединение к существующей сети 5000 вольт.
6 000 —	Нормально для всех случаев.
10 000 —	Для новых установок только в тех случаях, когда вероятно присоединение к существующей сети 10 000 вольт.
15 000 —	Нормально для всех случаев.
25 000 —	Для новых установок только в тех случаях, когда вероятно присоединение к существующей сети 25 000 вольт.
30 000 —	Нормально для всех случаев.
50 000 —	Для новых установок только в тех случаях, когда вероятно присоединение к существующей сети 50 000 вольт.
60 000 —	Нормально для всех случаев.
100 000 —	" " " "
200 000 —	" " " "

Для железнодорожных установок находит применение однофазный ток $16\frac{2}{3}$ пер./сек.

В. Установки постоянного тока.

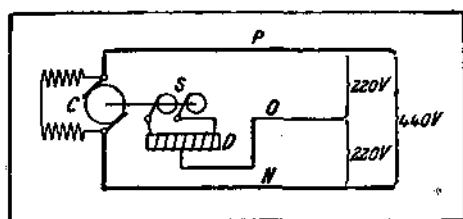
1. Генераторы.

Электрические станции постоянного тока имеют применение лишь для маленьких установок, так как при постоянном токе при употреблении аккумуляторной батареи возможна отдача тока также и при остановленных генераторах. Осветительные и трамвайные сети городов обычно присоединяются к преобразовательным подстанциям при наличии центральной электрической станции трехфазного тока.

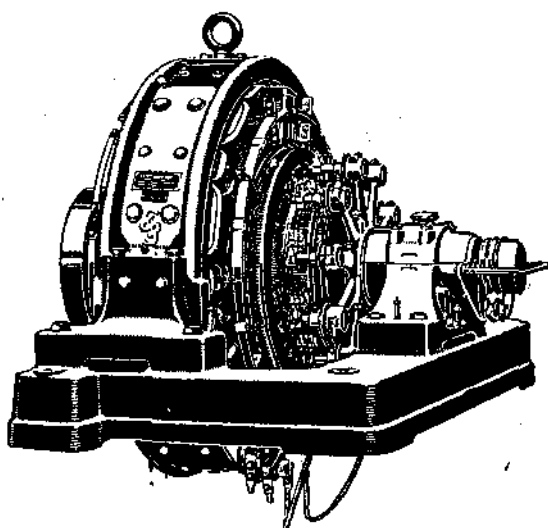
При работе на постоянном токе чаще всего находят себе применение шунтовые динамомашинны благодаря своим благоприятным электрическим свойствам и простому обслуживанию. Компаунд-динамо применяются только на станциях с тяжелым режимом работы, при котором приходится считаться с сильными колебаниями нагрузки, вызываемыми электрическими железными дорогами, шахтами и прокатными станами.

В трехпроводных установках постоянного тока ранее соединялись последовательно два генератора, и нулевая точка образовывалась соединительным проводом между обеими машинами. С применением делителя напряжения возможно работать с одной машиной, которая должна быть рассчитана на полное напряжение между крайними проводами.

Генераторы для трехпроводных систем имеют два контактных кольца, которые соединены с двумя противоположными точками якорной обмотки. С этими контактными кольцами соединена дроссельная катушка, к средней точке которой приключается нулевой провод (фиг. 395 и 396).



Фиг. 395. Трехпроводная динамомашина постоянного тока с делителем напряжения.



Фиг. 396. Трехпроводная динамомашина постоянного тока с делителем напряжения.

Для удовлетворительной параллельной работы существенно, чтобы все машины равномерно воспринимали на себя колебания нагрузки. Это достигается подбором возможно более одинаковых нагрузочных характеристик машин, представляющих собой зависимость клеммового напряжения от силы тока возбуждения, т.е. сопротивления якоря и обмотки возбуждения должны находиться в равном отношении к мощностям машин.

Для параллельного включения компаунд-динамо необходимо осуществить параллельное соединение всех серийных обмоток уравнительными проводами.

II. Аккумуляторы.

а) Принцип действия.

Аккумуляторы служат для накопления электрической энергии в форме постоянного тока; они состоят из двух родов свинцовых пластин, покрытых окисью — положительных и отрицательных, расположенных в наполненных разведенной серной кислотой сосудах (для малых элементов в стеклянных, для крупных — в обитых свинцом деревянных ящиках). Положительные и отрицательные пластины подвешиваются поочередно рядом с применением в качестве изолирующих материалов тонких, пропитанных деревянных дощечек, стеклянных трубок и тому подобного к осо-

бым держателям так, что против каждой отрицательной пластины находилась положительная. Положительные пластины так же, как и отрицательные, соединяются между собою автогенно сваренными цинковыми полосами. Электроды должны быть всегда покрыты кислотой и во избежание коротких замыканий не должны опираться о дно сосуда; на дне сосуда должно быть достаточно места для осадка, образующегося во время работы. Для наполнения аккумуляторов должна употребляться только разведенная химически-чистая серная кислота удельного веса около 1,17 при 15°С. Качество употребляемой для наполнения кислоты оказывает существенное влияние на работу аккумулятора. Наполнение элементов впервые должно быть произведено незадолго до первой зарядки. С целью заряда соединяются между собою одноименные полюсы аккумулятора и динамомашины — обычно шунтовой. После продолжительного прохождения тока пластины приобретают способность отдавать электрическую энергию. При заряде происходит разложение серной кислоты, кислород идет на положительные пластины и образует перекись свинца, водород вытесняет из отрицательных пластин кислород и образует на них налет металлического свинца. При разряде химические процессы протекают в обратном направлении, при чем на обоих электродах вновь образуется окись свинца. Чем больше имеется активной массы, тем больше способность к восприятию энергии или „емкость“ элемента. Чтобы получить возможно более высокую емкость, следует многократно заряжать и разряжать элемент. Этот процесс называется „формированием“; при этом все время увеличивается количество свинца, вовлекаемого в химический обмен, и активная масса на пластинах усиливается.

Напряжение отдельных элементов во время заряда постепенно возрастает; это продолжается до тех пор, пока на электродах не начнется бурное образование пузырьков газа и напряжение одного элемента в заключительный период не достигнет 2,6—2,7 вольт. При разряде напряжение падает в короткое время до 1,9 вольт, понижается постепенно, по мере расхода тока, до 1,83 вольта и затем быстро падает. При 1,85 вольт следует прекращать разряд.

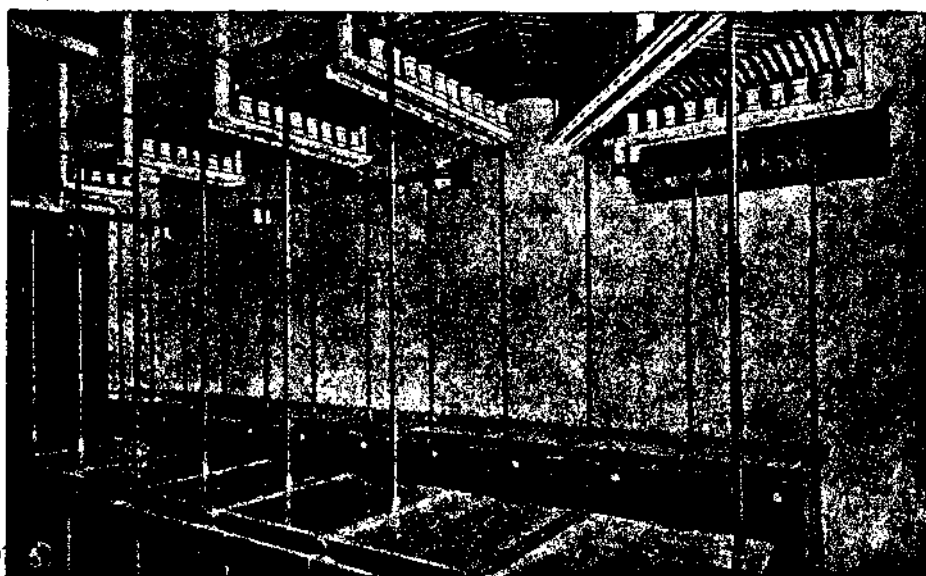
Представление о величине коэффициента полезного действия аккумуляторов дает нижеследующая таблица, составленная в предположении, что заряд производится до 2,6 вольт и разряд до 1,83 вольта на элемент и при одной и той же силе тока и, далее, что заряд производится в течение 24 часов после разряда.

	Продолжительность разряда		
	3 часа	5 часов	7 часов
Плотность тока разряда A/dm^2 . . .	1,00 — 1,25	0,7 — 0,85	0,5 — 0,65
Коэффициент полезного действия по амперчасам	91 — 90%	93 — 92%	95 — 93%
Коэффициент полезного действия по ваттчасам	77 — 75%	82 — 79%	84 — 82%

В практических условиях, вследствие различных обстоятельств, эти величины не достигаются; можно считать коэффициент полезного действия равным, примерно, 70%.

б) Установка аккумуляторов.

Помещение, предназначенное для установки аккумуляторной батареи, должно быть достаточно просторным и светлым; стены и потолки должны быть выполнены так, чтобы в элементы не могла осыпаться штукатурка. Далее, помещение должно хорошо вентилироваться для удаления образующихся при заряде газов. Пол должен быть кислотоупорным. Стены и потолки покрываются кислотоупорным эмалевым лаком так же, как и железные конструкции и т. д., после предварительной обмазки суриком. Не следует ставить друг на друга больше чем два ряда элементов. При более крупных элементах рекомендуется ради более удобного ухода и для луч-



Фиг. 397. Помещение батареи с проводами к элементному коммутатору.

шей наглядности батареи монтировать на стеллажах и притом таким образом, чтобы элементы были легко доступны с обеих сторон. Проходы для обслуживания снабжаются помостами, которые для напряжений до 250 вольт и при трехпроводных установках с заземленным нулевым проводом до 2×250 вольт не изолируются.

Помосты для установок высокого напряжения до 750 вольт снабжаются стеклянными подножками со сточными ребрами.

Фиг. 397 изображает помещение батареи.

III. Схемы соединений.

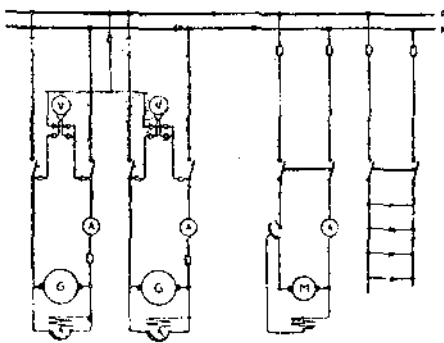
а) Схемы соединений для установок постоянного тока без аккумуляторной батареи.

1. Двухпроводные сети.

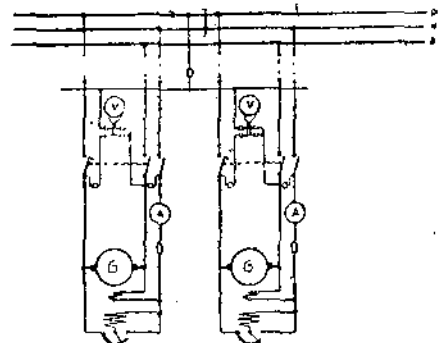
Основой для построения всякой электрической установки является схема соединений. Соединение для двух параллельно работающих двухпроводных шунтовых генераторов постоянного тока показано на фиг. 398.

Параллельное соединение компаундных генераторов не столь просто, как шунтовых, ибо напряжение на клеммах устанавливается не только

шунтовым регулятором, но, при переменной нагрузке, самостоятельно изменяется также и влиянием последовательной обмотки. Для того, чтобы равномерно распределить нагрузку между всеми параллельно работающими генераторами, требуется произвести параллельное соединение всех последовательных обмоток уравнительным проводом по фиг. 399.



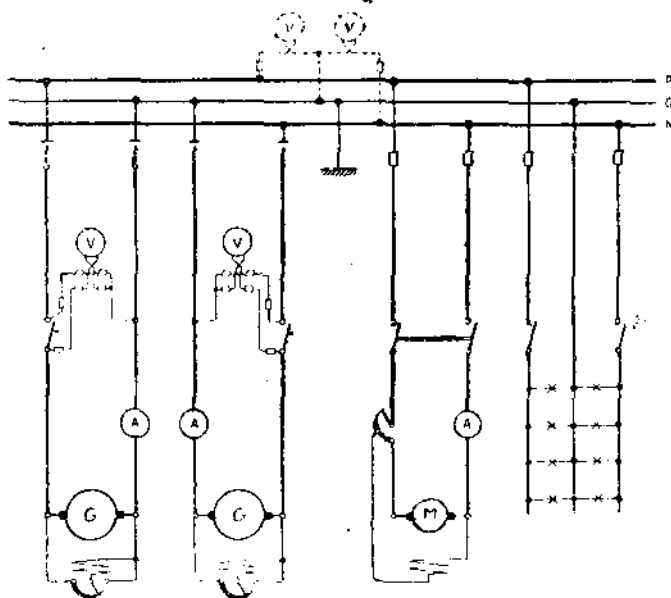
Фиг. 398. Двухпроводная сеть без батарей с шунтовым генератором.



Фиг. 399. Двухпроводная сеть без батарей компаундным генератором.

2. Трехпроводные сети.

Для получения трехпроводной сети постоянного тока в прежнее время обычно включались последовательно два генератора (фиг. 400) и нулевая точка образовывалась соединительным проводом между обоими генераторами.



Фиг. 400. Трехпроводная сеть с двумя последовательно включенными шунтовыми генераторами.

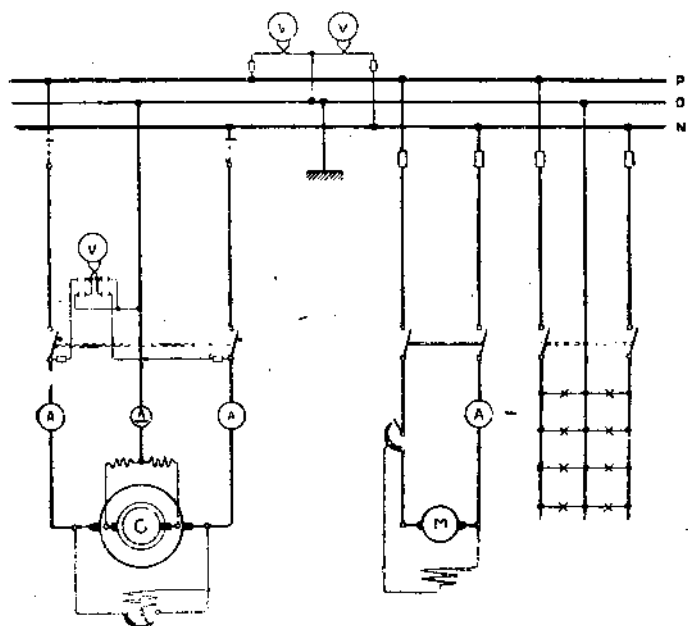
При применении делителя напряжения возможно питать трехпроводную сеть только одной машиной (фиг. 401). Генератор должен быть снабжен для этой цели, помимо коллектора, двумя контактными кольцами, соединенными с двумя противоположными точками якорной обмотки.

б) Схемы соединения для установок постоянного тока с аккумуляторной батареей.

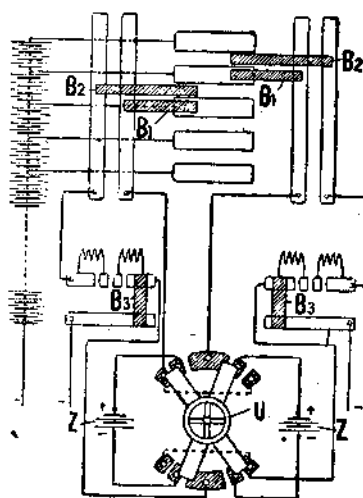
Вопрос о выборе одинарного или двойного элементного коммутатора разрешается в зависимости от того, должна ли батарея во время заряда отдавать ток в сеть.

Полное количество элементов батареи вычисляется по напряжению в конце разряда; так, для 110 вольт требуется

$$\frac{110}{1,83} = 60 \text{ элементов.}$$



Фиг. 401. Трехпроводная установка, шунтовой генератор с делителем напряжения.



Фиг. 402. Элементный коммутатор с вспомогательными элементами.

При применении одинарного элементного коммутатора, так как напряжение заряженных элементов составляет по 2,1 вольт, при 110-вольтовой сети должно быть вначале отключено

$$60 - \frac{110}{2,1} = 8 \text{ элементов,}$$

т.е. элементный коммутатор должен обладать 9 контактами.

При двойном элементном коммутаторе батарея может давать ток в сеть также и во время заряда, т.е. она представляет постоянный резерв для мгновенных толчков нагрузки. Так как в конце заряда напряжение элемента поднимается до 2,75 вольт, то при 110-вольтовой сети должно быть отключено первоначально

$$60 - \frac{110}{2,75} = 20 \text{ элементов,}$$

т.е. одна треть полного их количества; поэтому элементный коммутатор должен быть снабжен 21 контактом.

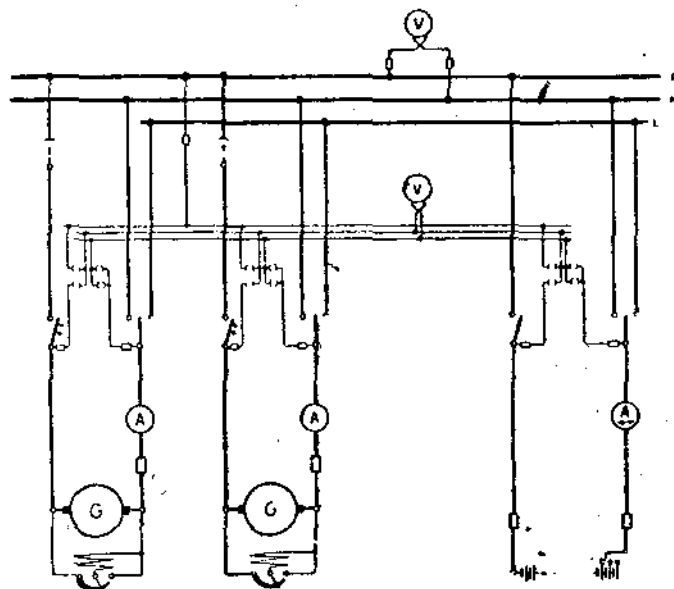
При напряжении сети 220 вольт включают по 2 элемента между каждыми 2 контактами. Применением вспомогательных элементов, которые при передвижении контактов элементного коммутатора приключаются и отключаются, можно уменьшить число контактов последнего и число соединительных проводов (фиг. 402).

1. Двухпроводные сети.

Вышеуказанные схемы соединения для генераторов находят применение также и в схемах с батареями, но при этом следует различать три способа заряда батарей:

- а) повышением напряжения главной машины,
- б) вольтодобавочной машиной,
- с) несколькими отдельными секциями батарей.

Схема заряда повышением напряжения главной машины с одинарным элементным коммутатором (фиг. 403) может найти применение лишь в весьма малых установках, отдающих ток вечером, в то время как в течение дня батарея заряжается при отключенной сети.

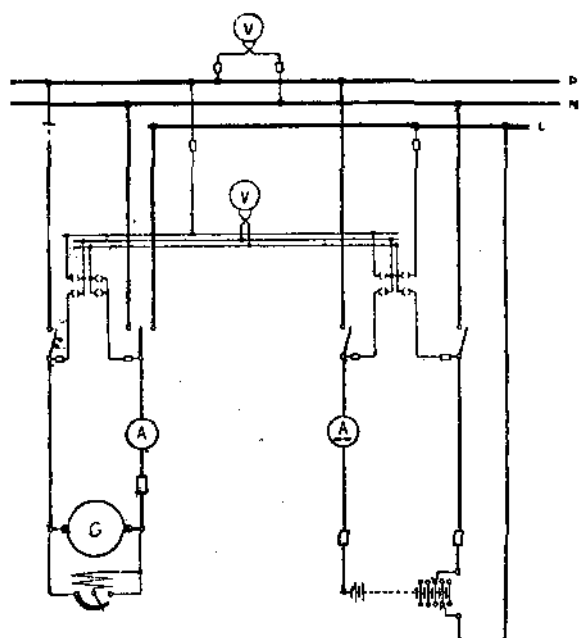


Фиг. 403. Двухпроводная установка, батарея с одинарным элементным коммутатором и шунтовые генераторы для заряда аккумуляторов.

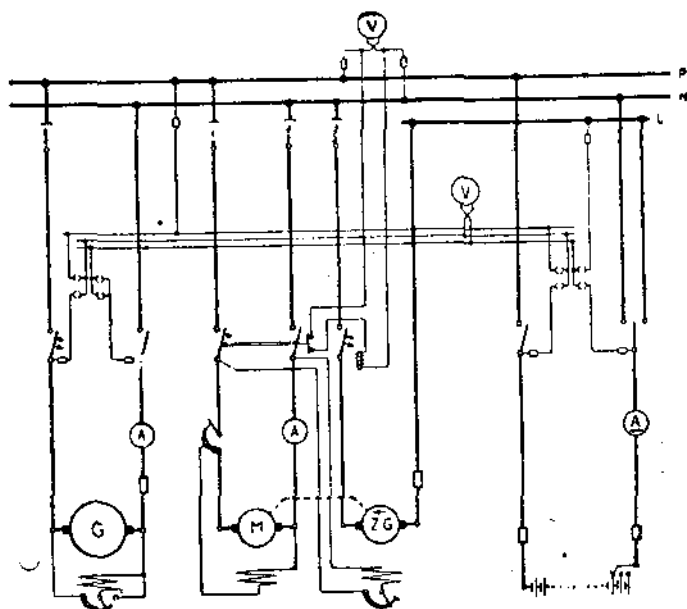
В схеме с зарядом путем повышения напряжения главной машины при двойном элементном коммутаторе (фиг. 404) одновременно может отдаваться ток и в сеть. Если батарея не слишком мала по отношению к машинам, она представляет при этом постоянный резерв для мгновенных толчков нагрузки.

Переключатель без перерыва тока позволяет перейти с заряда на параллельную работу без перерыва работы.

Заряд батареи при помощи вольтодобавочной машины (фиг. 405) находит себе место главным образом тогда, когда величина батареи в сравнении с генератором мала. При применении двойного элементного коммутатора батарея представляет резерв для мгновенных толчков нагрузки.

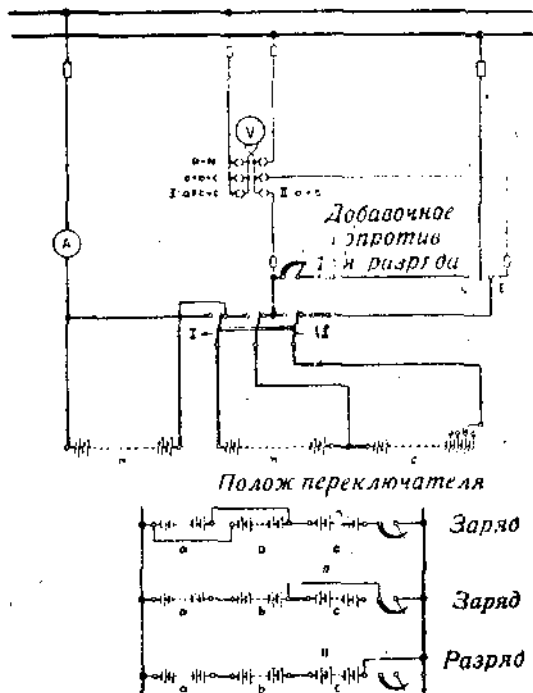


Фиг. 404. Двухпроводная сеть, батарея с двойным элементным коммутатором.



Фиг. 405. Двухпроводная сеть, батарея с одинарным элементным коммутатором и вольтодобавочным генератором.

Заряд батареи, состоящей из нескольких последовательно включаемых частей (фиг. 406), применяется только при очень маленьких батареях, чтобы избежать применения вольтодобавочной машины. Вследствие потерь в добавочных сопротивлениях этот способ заряда неэкономичен.



Фиг. 406. Батарея, соединенная в вилку для заряда генератором без повышения напряжения.

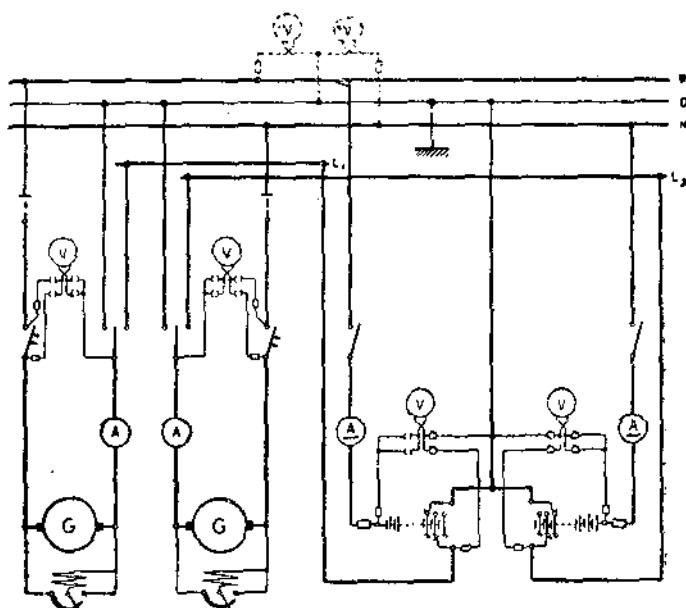
2. Трехпроводные сети.

Деления напряжения с помощью одной лишь батареи следует избегать, ибо тогда отдельные половины ее нагружаются различно.

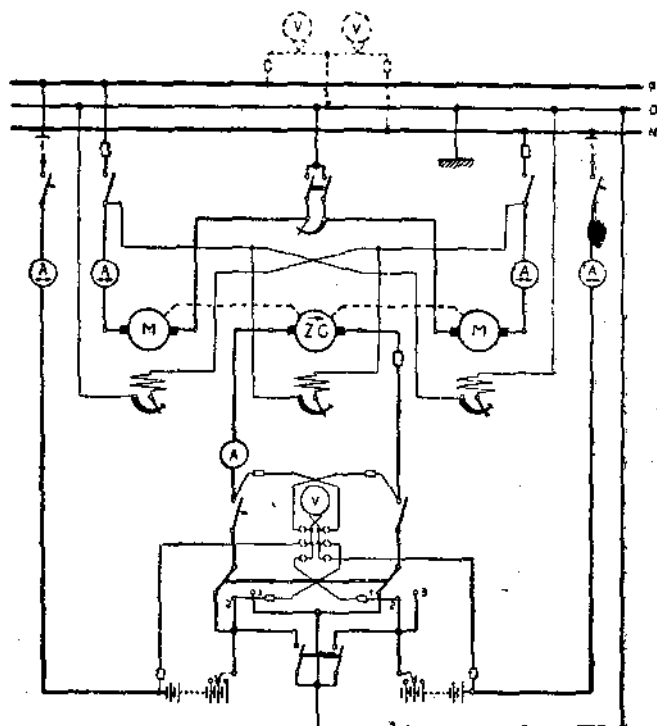
Элементные коммутаторы могут приключаться либо к крайнему проводу, либо к среднему. Последнее расположение имеет то преимущество, что элементные коммутаторы не получают повышенного напряжения по отношению к земле, а с другой стороны, приключение к крайнему проводу дает то преимущество, что с помощью зарядной рукоятки возможно также держать повышенное напряжение сети в удаленных питательных пунктах. Как правило, при соединении с вольтодобавочной машиной также применяется двойной элементный коммутатор, чтобы иметь резерв по отношению к мгновенным толчкам нагрузки.

а) Трехпроводная сеть с двумя последовательно включаемыми генераторами.

Удвоением соединения фиг. 404 получается трехпроводное соединение с двумя последовательно расположенными главными машинами и двойными элементными коммутаторами (фиг. 407). Обе главные машины могут также быть заменены одним работающим на внешние провода генератором с делителем напряжения, напряжение которого может повышаться до зарядного напряжения батареи.



Фиг. 407. Трехпроводная сеть, батарея с двойным элементом коммутатором и два генератора для заряда в последовательном соединении.



Фиг. 408. Трехпроводная установка, батарея с одинарным элементом коммутатором и добавочным уравнительным трехмашинным агрегатом.

б) Трехпроводная сеть с вольтодобавочной машиной и двумя уравнительными машинами.

Трехпроводная схема с одной вольтодобавочной машиной и двумя уравнительными машинами (фиг. 408) получается дублированием схемы по фиг. 405, при чем обе вольтодобавочные машины могут быть замещены одной. Оба мотора включаются на половинное напряжение сети, а перекрестным соединением их обмоток возбуждения осуществляется уравнивающее действие в обеих половинах сети. Машины питают взаимно соответствующие половины сети.

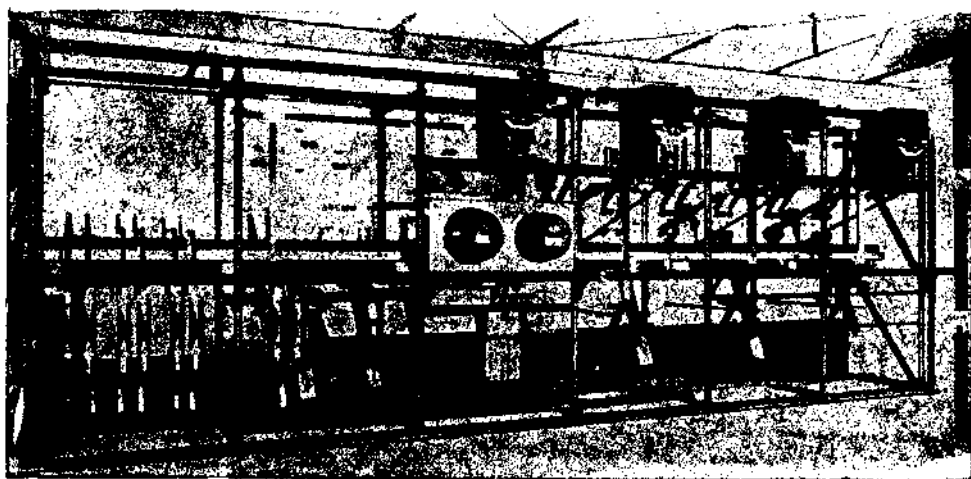
с) Трехпроводная сеть с двумя вольтодобавочными машинами и двумя уравнительными машинами.

Это соединение также может рассматриваться как дублированная схема фиг. 405. Как уже выяснено, схема с одной только вольтодобавочной машиной сохраняет то преимущество, что при элементных коммутаторах, приключенных к внешним проводам сети, с помощью зарядной рукоятки, можно держать повышенное сетевое напряжение в удаленных питательных пунктах.

IV. Распределительные устройства.

Распределительное устройство составляет одну из важнейших частей всей машинной установки.

Правила Союза германских электротехников определяют как установки низкого напряжения все установки сильного тока, при которых эффективное рабочее напряжение между любым проводом и землей не превосходит 250 вольт. Этому соответствуют осветительные и силовые



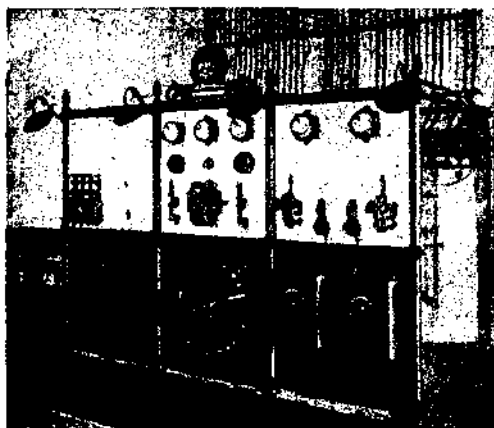
Фиг. 409. Распределительный щит установки постоянного тока, вид сзади.

установки, городов с напряжением в 2×200 вольт и заземленным нулевым проводом, в то время как трамвайные установки с напряжением 550, 750 и 1100 вольт считаются установками высокого напряжения.

При выполнении распределительного устройства должны быть приняты в расчет следующие общие требования:

- 1) максимальная надежность,
- 2) хорошая доступность осмотра и наглядность,
- 3) возможность расширения.

В установках постоянного тока, как правило, применяются распределительные щиты. Они состоят из железного каркаса (фиг. 409), который подразделяется в соответствии с числом машинных и распределительных проводов (фидеров) на отдельные панели с мраморными досками для размещения необходимых аппаратов и приборов.



Фиг. 410. Распределительные щиты установки постоянного тока, вид спереди.

Для того, чтобы получить возможно наименьшее сечение сборных шин, панели для генераторов располагают, вообще говоря, в середине распределительного устройства, а панели для фидеров — по обеим сторонам его. При этом расположении каждая часть сборных шин несет лишь часть тока, необходимую для соответствующих ответвлений, так что при равномерном распределении сечение должно рассчитываться лишь на половину общего тока.

Рубильники и автоматические выключатели могут изготовляться для монтажа впереди щита или же сзади. Маленькие элементные коммутаторы также помещаются впереди (фиг. 410), в то время как большие

помещаются отдельно и по большей части снабжаются дистанционным управлением. Самые щиты нормализованы различными фирмами (фиг. 411). Установки постоянного тока для подстанций с умформерами и выпрямителями выполняются аналогичным образом.

С. Трехфазные установки.

1. Генераторы.

а) Определение мощности генераторов.

Определение мощности генераторов производится, исходя из значения существующего или ожидаемого коэффициента мощности. Мощность задается в киловольт-амперах (kVA) при одновременном указании наименьшего допустимого $\cos \varphi$; так, если N есть мощность приводного мотора в лошадиных силах и η — коэффициент полезного действия генератора при полной нагрузке, то при индуктивной нагрузке мощность генератора выбирается по формуле:

$$P(\text{kVA}) = \frac{N \cdot 736 \cdot \eta}{100 \cdot \cos \varphi},$$

$\cos \varphi$ при индуктивной нагрузке колеблется, главным образом, в зависимости от величины присоединенных моторов и их числа, а также и от того, идут ли моторы под полной нагрузкой или же они лишь слабо нагружены.

б) Типы генераторов.

Открытые машины представляют наиболее употребительный тип для всех генераторов с низким числом оборотов.

Полузакрытые типы выбираются для более быстроходных машин средней мощности, как, например, для генераторов, приводимых в движе-

ние водяными турбинами или дизелями. При этом, вследствие стесненной конструкции, отвод тепла бывает затруднителен и вследствие сравнительно малого диаметра машины не хватает длинных каналов для замкнутой



Фиг. 411. Распределительный щит установки постоянного тока.

циркуляции охлаждающего воздуха; регулирование вентиляции происходит боковыми щитками, при чем одновременно заглушается и шум. Теплый воздух обычно, пока это еще возможно, выпускается в машинное помещение.

Совершенно закрытые типы имеют применение вследствие большого теплообразования и шума для быстроходных машин больших мощностей. Теплый воздух здесь собирается из кожухов и особым каналом выводится наружу. Движение воздуха поддерживается посредством насаженного на магнитное колесо вентилятора.

Выбор конструкции для целей проектирования в общем производится по следующим основным положениям. Образование шума и тепла зависит от произведения мощности в kVA на число оборотов в минуту ($P \cdot n$).

Нормальный открытый тип уместен, если

$$P \cdot n < 500\,000.$$

Для $n < 150$ допустимы большие значения $P \cdot n$.

Полузакрытый тип для $P \cdot n < 750\,000$, в особенности для более высоких чисел оборотов (300—500).

Совершенно закрытый тип для $P \cdot n \geq 750\,000$.

Эти соображения действительны для 50-периодных машин. В машинах с другими числами периодов следует рассуждать как о 50-периодных машинах с соответственно большим или меньшим числом полюсов.

с) Вентиляционные устройства для генераторов.

Совершенно закрытые генераторы и, в особенности, турбогенераторы вследствие своей компактной конструкции обладают малой по отношению к их мощности поверхностью и нуждаются для отвода выделяющегося в них тепла в мощной вентиляции. Для того, чтобы получить хорошее действие с малыми количествами воздуха, следует подавать охлаждающий воздух, главным образом, в места наибольшего теплообразования. Присос охлаждающего воздуха и удаление его по нагреванию производят сами машины с помощью укрепленных на роторах вентиляторов. Засасывающие штуцера находятся внизу под боковыми щитами машины; теплый воздух выдувается вниз через корпус статора.

Свежий охлаждающий воздух в редких случаях может браться непосредственно из подвального помещения под машинами, принимая во внимание расположенные внизу конденсационные установки, высокие в летние месяцы температуры и присутствие паров воды и масла. Обычно воздух, пропускаемый через машины, засасывается извне.

Место забора воздуха подлежит тщательному выбору. Лучше всего располагать его на северной стороне здания или в месте, в которое не проникает солнце. В засасывающее отверстие при сухой погоде не должна попадать пыль, поэтому концы воздухоподводящих каналов должны иметь отверстия не на поверхности земли, но на высоте нескольких метров. Воздух для охлаждения не должен забираться из аккумуляторных помещений из-за наличия кислотных паров.

Теплый отходящий воздух выводится наружу особыми каналами.

Каналы свежего воздуха должны быть прямолинейными, чтобы избежать загибов воздушного потока. Если загибов обойти не удастся, то они не должны быть более 45° , или же должны быть выполнены в виде очень пологих загибов с большим радиусом закругления. Острые углы и крутые повороты непригодны, ибо образуют мертвые пространства, в которых возникают потери от ударов и завихривания. Изменений поперечного сечения следует также по возможности избегать и допускать лишь постепенные воронкообразные переходы. Также и отверстие канала должно расширяться в виде воронки.

Поперечное сечение каналов должно браться возможно большим — тем больше, чем длиннее канал. Как наименьшее поперечное сечение для каналов длиной до 10 м, следует считать такое, при котором скорость воздуха не превосходит в подводящем канале 8 м/сек. и в отводящем 6 м/сек.

Каналы могут выполняться из листового железа, дерева с гипсовой обмазкой или кладки с рабицом или же непосредственно осуществляться в виде выемок в фундаментах.

Конденсация пара внутри машины во время покоя ее безусловно должна избегаться. Это достигается помещением в подводящем и отводящем каналах запорных заслонок.

Для того, чтобы исключить возможность отсутствия циркуляции воздуха через машину, если по ошибке клапаны перед пуском ее в ход были закрыты, заслоны устраиваются так, что при закрытии каналов одновременно осуществляется соединение с машинным залом или же делается невозможным возбуждение машин при закрытых заслонах.

Термометры, помещенные в потоке входящего холодного и выходящего теплого воздуха, должны быть легко доступны для машиниста и должны иметь отметки наивысшей и наименьшей допустимой (около $+5^{\circ}\text{C}$) температуры. Клапаны в отводящем канале могут быть предусмотрены таким образом, чтобы подогретый отходящий воздух мог быть использован для отопления станций.

Для надежности работы генератора имеет очень большое значение, чтобы засосанный извне холодный воздух попадал в генератор свободным от пыли, ибо заносимое загрязнение при отложении на частях обмотки приводит в короткое время к чрезмерному нагреванию отдельных частей и, вследствие ухудшения изоляции, к пробоем. Особенно опасна угольная пыль, так как она весьма легко подвижна и легковоспламеняема. Содержание пыли в охлаждающем воздухе не должно превосходить $0,5 \text{ мгр/м}^3$.

Многие аварии турбогенераторов происходят от засорения статорной и роторной обмоток. Следует поэтому считать необходимым, чтобы: 1) каждый генератор должен был снабжен фильтрами и 2) чтобы последние подвергались периодической чистке.

Матерчатые и карманные фильтры вытеснены фильтрами без материи.

Водоструйные фильтры не должны располагаться слишком близко к генератору, чтобы частицы воды не могли попадать в генератор. Также недопустимо помещать вблизи генератора и висциновые фильтры, чтобы масло не заносилось в генератор.

В последнее время для турбогенераторов широко применяется замкнутое воздушное охлаждение с охлаждением воздуха ¹⁾.

Для приближенных подсчетов количество охлаждающего воздуха может быть определено из формулы:

$$Q = 3,5 \left(\frac{W}{1000} \right)^{\frac{2}{3}}$$

где

Q — количество воздуха в $\text{м}^3/\text{сек.}$

W — номинальная мощность машин в kVA.

Допустимая потеря давления в воздухоохладителе:

для машин мощностью до 5000 kVA — 10 мм водяного столба,

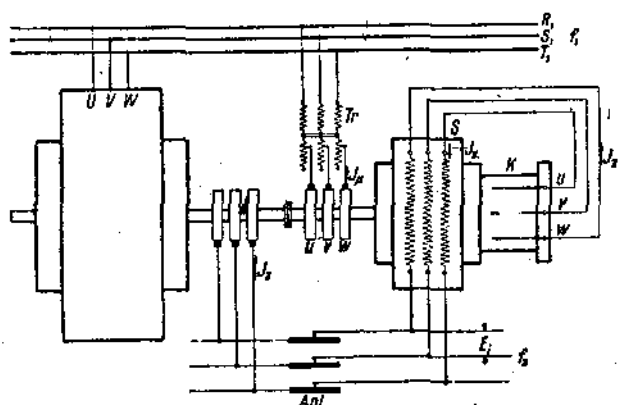
для машин мощностью свыше 5000 kVA — 15 мм водяного столба.

¹⁾ Следует отметить недавно предложенное замкнутое охлаждение электрических машин водородом, имеющим весьма большую теплоемкость, а также новые устройства для автоматического тушения пожаров обмоток впуском углекислоты.

Температура охлаждающего воздуха, поступающего в машину, принимается равной 25° , в то время как температура отходящего воздуха составляет 55° С, так что воздухоохладитель должен охлаждать циркулирующий воздух на 30° .

г) Асинхронные машины реактивного тока.

Развитие возбудительных машин трехфазного тока, в особенности с посторонним возбуждением, было главной причиной появления вопроса об асинхронных генераторах. Их применение, как известно, задерживалось тем, что обычные асинхронные генераторы забирают реактивную мощность из сети и тем самым сильно снижают эффект выигрыша в активной мощности из-за значительного возрастания реактивной мощности в сети машин. Применение возбудительного генератора трехфазного тока дало возможность преодолеть это затруднение. Так как такая машина в состоянии покрыть расход тока на создание магнитного поля при всяких нагрузках, то



Фиг. 412. Асинхронный генератор в каскаде с компенсированной машиной трехфазного тока с посторонним возбуждением.

и во время малой активной нагрузки происходит не столь значительное ухудшение коэффициента мощности от асинхронного генератора. При разгрузке генератора наступает значительное возрастание намагничивания, которое в этом случае создает отдачу реактивной мощности в сеть, что имеет следствием улучшение коэффициента мощности сети. Далее, машины с посторонним возбуждением могут работать как мотор или как генератор, без переключения возбуждения или возбудителя. Подобные условия работы

получаются, если первичные двигатели, например, водяные турбины работают на одном валу с асинхронными машинами. Смотря по тому, превосходит или не достигает мощность двигателя потребление механической мощности, передаваемой валом, асинхронная машина работает с хорошим коэффициентом мощности или как мотор, или как генератор. При машине с само возбуждением подобные изменения работы были бы возможны лишь при переключении возбудителя. Здесь надо было бы или взаимно переменить две фазы, или же изменить направление вращения агрегата. Таким образом, мы подошли к асинхронной машине реактивного тока (фиг. 412), служащей генератором для отдачи чисто реактивно-емкостной мощности. Эти машины по сравнению с ранее употреблявшимися работающими в холостую синхронными моторами обладают существенными преимуществами, в том числе более простым пуском в ход совершенным устранением всякой опасности появления качаний, повышением надежности в смысле выпадения из синхронизма, малыми потерями и значительным уменьшением мгновенного тока короткого замыкания. В особенности ценна последняя особенность, так как при применении синхронных генераторов реактивного тока ток короткого замыкания может возрасти до величины, неприемлемой для имеющихся распределительных аппаратов. Продолжительный ток короткого замыкания в асинхронных машинах ре-

активного тока вообще равен нулю. Следующее преимущество этих машин заключается в возможности путем противовозбуждения искусственно повышать потребление реактивной мощности, т.е. создавать индуктивную нагрузку. При регулировании напряжения путем создания реактивной мощности действие машины реактивного тока значительно усиливается, благодаря способности ее к большой индуктивной нагрузке. Дело в том, что сумма максимальных значений получаемой и отдаваемой реактивной энергии является критерием для оценки регулирующего действия машины реактивного тока. Однако развитие подобных асинхронных машин с трехфазными возбудительными машинами с посторонним возбуждением преследует еще и другие цели, так что в этой области намечается переход от несамостоятельных генераторов и асинхронной машины реактивного тока к самостоятельно сохраняющему постоянное число периодов асинхронному генератору.

II. Трансформаторы.

а) Трансформаторы для силовых станций.

При современном развитии установок высокого напряжения построение трансформаторов получает все большее значение. Помимо повышения напряжения, которое становится возможным благодаря успехам изоляционной техники, наблюдается переход к все увеличивающимся единицам.

Однако крупнейшая до сего времени мощность в 60 000 kVA в одной единице еще не превзойдена (фиг. 413).



Фиг. 413. Трехфазный трансформатор, мощностью 60 000 kVA.

Различают трансформаторы с сухой изоляцией и с изоляцией маслом. Трансформаторы с масляной изоляцией строятся для естественного или для водяного охлаждения. Подходящие конструкции кожухов с стенками, состоящими из сваренных автогеном волнистых листов, дают возможность выполнять трансформаторы с естественным охлаждением на мощности до 8000 kVA.

При более значительных мощностях все же естественное охлаждение масла становится недостаточным и приходится применять искусственное охлаждение:

а) Внешнее орошение кожуха при этом получается слишком большой расход охлаждающей воды.

б) Внутреннее водяное охлаждение; оно осуществляется с помощью свинцового змеевика, расположенного в верхней части кожуха трансформатора, по которому и протекает охлаждающая вода.

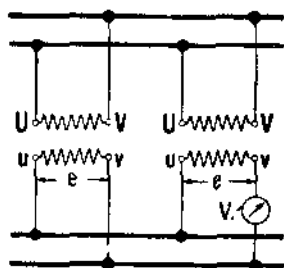
с) Внешнее водяное охлаждение; при этой системе теплое масло извлекается из верхней части трансформатора насосом и прогоняется через змеевик, помещенный в проточной воде, или же охлаждается воздушным охладителем вне масляного бака. Охлажденное масло вновь вводится в трансформатор в нижнюю часть кожуха. При этом расположении можно не бояться загрязнения и при нечистой воде ¹⁾.

Главное требование для надежности работы трансформатора заключается в сохранении масла в хорошем, неизменном и свободном от влаги состоянии. Тщательным, основанным на долговременных наблюдениях, выбором масла удастся все более и более сократить число аварий, имеющих причиной разложение или загрязнение масла. При этом самое лучшее масло обнаруживало еще некоторую склонность к образованию осадков. Как показали произведенные исследования, причина этого заключалась в том, что масло в нагретом состоянии окислялось при соприкосновении с воздухом и, вследствие этого, разлагалось.

Введением консерваторов масла значительно повышается сохранность масла и устраняется конденсация воды на крышке и кожухе внутри трансформатора.

Параллельная работа трансформаторов.

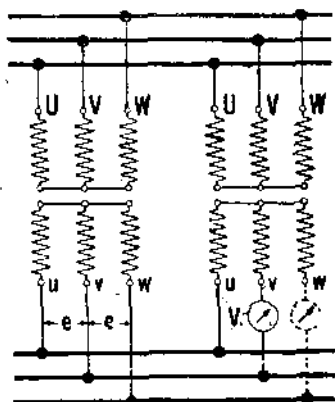
Под параллельной работой трансформаторов в узком смысле понимается включение нескольких трансформаторов между общей первичной и общей вторичной сетями, при чем различные трансформаторы или непосредственно соединяются между собой, или же распределяются между общими первичными и вторичными сборными шинами, так что между отдельными трансформаторами находятся большие или меньшие участки проводов (фиг. 414 и 415).



Фиг. 414. Параллельно включенные однофазные трансформаторы.

Первым условием для параллельной работы является равенство напряжений холостого хода по величине и по фазе. Отклонения от величины напряжения в той же фазе создают уравнивающий ток между трансформаторами, величина которого зависит от разности напряжений и величины напряжения

короткого замыкания трансформаторов и, далее, от индуктивного и омического сопротивления находящихся между трансформаторами проводников. При включении фаз навстречу образуется короткое замыкание.



Фиг. 415. Параллельно включенные трехфазные трансформаторы.

¹⁾ Внешнее водяное охлаждение по сравнению с внутренним имеет еще то преимущество, что при нем возникновение неплотностей в змеевике сразу обнаруживается появлением масла на поверхности воды в охлаждающем резервуаре, при чем возможность попадания воды в масло уменьшается благодаря тому, что масло прогоняется под давлением. Кроме этого, исключается возможность повреждений змеевика случайно оставшейся в нем на время бездействия трансформатора и замерзшей водой.

Трехфазные трансформаторы по различным видам соединений в отношении сдвига фаз между первичным и вторичным напряжением могут быть разделены на 4 группы: *A, B, C* и *D* (фиг. 416).

Трансформаторы каждой группы, например A_1, A_2, A_3 , могут работать параллельно между собой прямо без перемены индексов у выводов обмоток.

Трансформаторы разных групп *A* и *B* не в состоянии работать параллельно.

Вообще, как при установке с непосредственным соединением, так и при работе на общие сборные шины, удовлетворительно работают параллельно только такие трансформаторы, которые имеют равные коэффициенты трансформации при холостом ходе и напряжения короткого замыкания которых разнятся между собой не более чем на 10—15%.

Получение одинакового коэффициента трансформации при холостом ходе трансформаторов почти всегда может быть достигнуто. Затруднения возникают лишь в том случае если при малых первичном и вторичном напряжениях мы имеем дело со сравнительно большой мощностью. В подобных случаях сперва требуется установить с помощью добавочных автотрансформаторов равенство коэффициентов трансформации при холостом ходе. Это применимо также и к уже имеющимся трансформаторам с неравными коэффициентами трансформации при холостом ходе, когда не хотят прибегать к изменению обмотки.

Величина напряжения короткого замыкания является для трансформатора данной модели величиной постоянной и, вообще говоря, не может быть изменена без полной переделки трансформатора.

Под напряжением короткого замыкания понимается то напряжение, которое необходимо иметь на первичной обмотке, чтобы получить определенную силу тока при коротко-замкнутой вторичной обмотке. Обычно задается в процентах от рабочего напряжения то напряжение, которое необходимо иметь на первичной обмотке, чтобы при коротко-замкнутой обмотке получить силу тока, соответствующую нормальной мощности трансформатора.

При одинаковом коэффициенте трансформации при холостом ходе мощность распределяется между параллельно включенными трансформаторами пропорционально номинальным мощностям и их и обратно пропорционально напряжениям короткого замыкания. Если $L_1, L_2, L_3 \dots$ суть номинальные мощности трансформаторов, а $e_{k1}, e_{k2}, e_{k3} \dots$ их напряжения короткого замыкания, то мощность распределяется между отдельными трансформаторами в отношении

$$I_1 : I_2 : I_3 \dots = \frac{L_1}{e_{k1}} : \frac{L_2}{e_{k2}} : \frac{L_3}{e_{k3}} \dots$$

Так как напряжения короткого замыкания изменяются прямо пропорционально току, то можно легко определить допустимую общую нагрузку для нескольких трансформаторов с неравными напряжениями короткого замыкания или же рассчитать распределение определенной мощности между отдельными трансформаторами.

Последовательным включением дроссельных катушек к трансформаторам с меньшими напряжениями короткого замыкания возможно получить требуемое равенство полных падений напряжения и тем самым правильное распределение нагрузок. Дроссельные катушки рассчитываются для каждого данного случая. При трехфазных трансформаторах дроссельные катушки должны быть введены в каждый из трех проводов, или же могут быть применены трехфазные дроссельные катушки. Вообще установка этим

Группы включения	Векторные диаграммы		Схема включения	
	Высокое напряж.	Низкое напряж.	Высокое напряж.	Низкое напряж.
I. Однофазные трансформаторы:				
Группы включения $A^1)$				
II. Трехфазные трансформаторы:				
Группы включения A	A_1			
	A_2			
	A_3			
Группы включения B	B_1			
	B_2			
	B_3			
Группы включения C	C_1			
	C_2			
	C_3			
Группы включения D	D_1			
	D_2			
	D_3			

Фиг. 416. Группы включения трансформаторов.

¹⁾ Схема составлена таким образом, что направление обмоток одинаково, если исходить из зажимов с одинаковым обозначением.

удорожается незначительно, так что дроссельные катушки представляют удобное средство и почти всегда дают наимыгоднейшее решение вопроса.

При параллельной работе трансформаторов на общие сети при более или менее значительных расстояниях между ними в общем сохраняют силу те же основные соображения, как и при параллельной работе на сборные шины, но только влияние разницы в коэффициентах трансформации при холостом ходе или напряжений короткого замыкания на распределение нагрузок уменьшается индуктивным и омическим сопротивлением участков проводов, лежащих между трансформаторами.

Во многих больших сетях становится возможным объединить трансформаторы с большими напряжениями короткого замыкания, например более старой конструкции, в одной части сети, с трансформаторами с меньшими напряжениями короткого замыкания в другой более отдаленной части сети.

Трансформаторы, при правильном исполнении, поставляются снабженные пометками так, что помеченные одинаковыми буквами (U , V , W на стороне высокого напряжения, и u , v , w на стороне низкого напряжения) клеммы могут присоединяться к одним и тем же шинам. Однако, чтобы избежать опасного ошибочного приключения, следует при первом включении параллельно присоединенных трансформаторов соблюдать осторожность. Если система параллельно включенных трансформаторов долгое время не была под напряжением, всегда рекомендуется прежде приключения трансформатора убедиться измерением в правильности соединения фаз.

б) Вращающиеся трансформаторы ¹⁾.

Для того, чтобы в установках переменного тока достигнуть выравнивания колебаний напряжения на удаленных питательных пунктах при меняющейся нагрузке, употребляются обычно добавочные трансформаторы, вторичные обмотки которых, включенные в линию последовательно при большой нагрузке питательного пункта, повышают сниженное напряжение линии на недостающую величину или при слабой нагрузке снижают напряжение линии до нормальной величины добавочным напряжением противоположного направления.

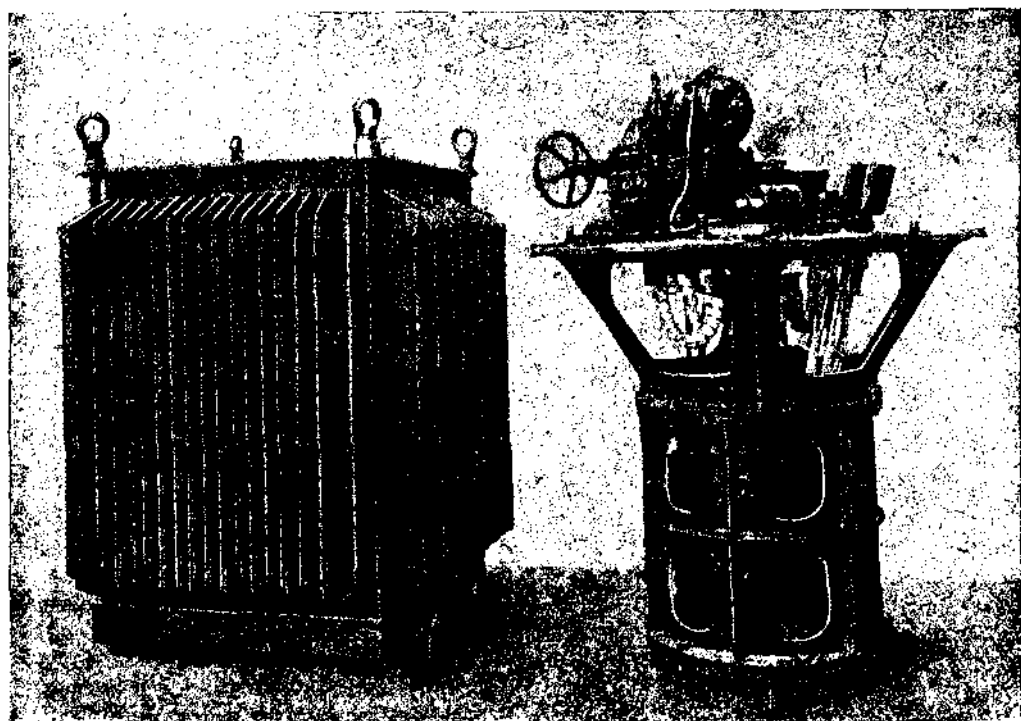
В качестве добавочного трансформатора употребляются, как правило, трансформаторы, построенные в виде асинхронного мотора, поворачивающийся ротор которого автоматически устанавливается действующей первичной передачей в любом положении.

В этих вращающихся трансформаторах (фиг. 417) регулирующее действие основано на установке ротора и на изменении относительного положения первичной и вторичной обмоток (статора и ротора). Так как ротор может быть установлен в любом положении, то изменять напряжение возможно непрерывно и плавно на сколь угодно малую величину.

К одной из обмоток прилагается напряжение сети, другая включается последовательно с линией. Во вращающихся трансформаторах простой конструкции добавочное напряжение при постоянном линейном напряжении независимо от положения ротора имеет всегда одинаковые значения. Вследствие вращающегося поля все время одной и той же силы, обмотки статора и ротора, если они расположены друг против друга зеркально, получают напряжения, совпадающие по фазе. Если же обмотки расположены так, что из соответствующих катушек на статоре и роторе сторона одной находится под серединой другой, для чего при наиболее употребительной четырехполюсной обмотке вращающихся трансформаторов нужен поворот

¹⁾ В русской литературе употребляется иногда термин „потенциал-регулятор“.

ротора на 45° по отношению к ранее фиксированному положению катушки, тонапряжения в обмотках статора и ротора взаимно сдвигаются на $\frac{1}{4}$ периода, т.-е. на 90° . После поворота ротора еще на $\frac{90}{p}$ ¹⁾ пространственных угловых градуса, оба напряжения получают относительный сдвиг фаз на $\frac{1}{2}$ периода, т.-е. они в каждый момент направляются противоположно. Таким образом, возможно геометрически прибавлять к линейному напряжению под любым сдвигом фаз в зависимости от положения ротора образующееся во вращающемся трансформаторе все время постоянное по величине добавочное напряжение.



Фиг. 417. Вращающийся трансформатор.

Следовательно, добавочное напряжение, а с ним и результирующее напряжение изменяются по фазе в обыкновенных вращающихся трансформаторах путем одного изменения положения ротора. Поэтому простые вращающиеся добавочные трансформаторы нельзя включать параллельно с другими трансформаторами.

Если же нужно предусмотреть и это, то применяются жестко сцепленные вращающиеся трансформаторы, первичные обмотки коих соединяются друг с другом параллельно, а вторичные—последовательно.

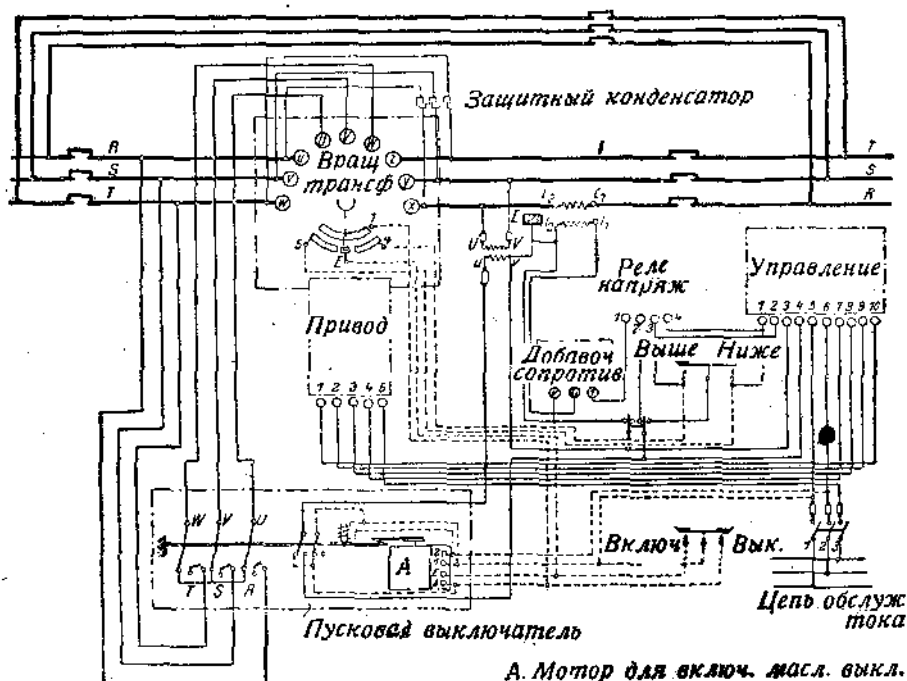
Кожух заполняется маслом. Трансформатор может вместе с клеммами выниматься из масляного бака.

Вращение трансформатора производится от руки или маленьким электромотором, поставленным на крышке вращающегося трансформатора и соединенного с валом двойной червячной передачей.

¹⁾ p —число полюсов.

Приводной мотор может также пускаться в ход автоматически, с помощью реле напряжения, которое замыканием цепи обслуживающего тока через направляющий аппарат в том или другом направлении дает или снимает напряжение (фиг. 418). Реле напряжения может устанавливаться на регулировку постоянного напряжения, т.е. на поддержание постоянным определенного напряжения, или на регулировку повышающегося напряжения, т.е. на повышение напряжения, пропорциональное проходящему току.

Слишком большой поворот при моторном приводе прекращается, концевым выключателем, который размыкает цепь тока управления, если ротор приходит в крайнее положение.



Фиг. 418. Вращающийся трансформатор с автоматической регулировкой.

Главные преимущества устройства заключаются в том, что главный ток не проходит через какие-либо скользящие или представляемые контакты, а только наглухо соединенную обмотку, так что напряжение может изменяться непрерывно и равномерно и окончательная величина добавочного напряжения совершенно независима от силы главного тока.

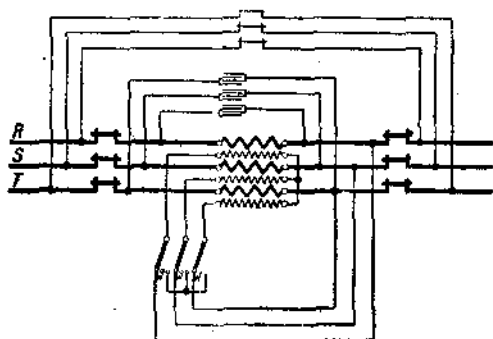
Вращающиеся трансформаторы по сравнению со ступенчатыми трансформаторами представляют то преимущество, что в цепи рабочего тока не имеется никаких регулирующих контактов, однако же их применение часто затрудняется вследствие высокой стоимости.

Во многих случаях поэтому предпочтительнее применение нижеописываемого способа регулирования напряжения в трехфазных установках, дающее возможность получать во время нормальной работы пять различных напряжений с помощью одной ступени напряжения и добавочного трансформатора.

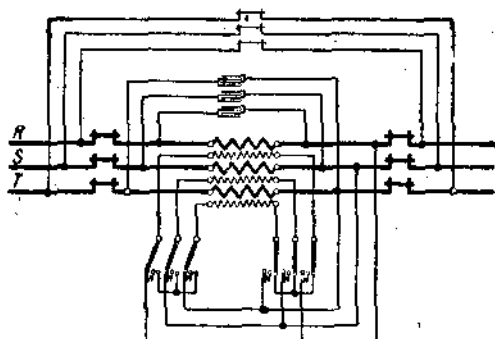
с) Добавочные трансформаторы.

Добавочные трансформаторы посредством патентованных фирмой Сименс-Шуккерт предохранительного и пускового выключателей могут безболезненно включаться и выключаться во время работы. Если обозначить через E — приложенное напряжение, а через e — добавочное напряжение, то подобным выключателем возможно получение напряжений E и $(E+e)$ или $(E-e)$ (фиг. 419).

При применении второго пускового выключателя, расключающего нулевую точку возбуждающей обмотки, возможно получить три ступени напряжения, а именно $(E+e)$, $(E\pm 0)$, $(E-e)$ (фиг. 420).



Фиг. 419. Добавочный трансформатор.



Фиг. 420. Добавочный и противодобавочный трансформатор.

Переключением со звезды на треугольник возбуждающих обмоток получаются еще две ступени напряжения, так что ступень напряжения и соответствующий добавочный трансформатор могут дать следующие пять напряжений.

- 1) $E+e$ — возбуждающая обмотка соединена треугольником, добавочный трансформатор.
- 2) $E+0,5e$ — возбуждающая обмотка соединена звездой, добавочный трансформатор.
- 3) $E\pm 0$ — возбуждающая обмотка коротко замкнута на себя.
- 4) $E-0,5e$ — возбуждающая обмотка соединена звездой, противодобавочный трансформатор.
- 5) $E-e$ — возбуждающая обмотка соединена треугольником, противодобавочный трансформатор.

Переключение целесообразно выполнять контроллером, который гарантирует правильную последовательность разных ступеней напряжения. Переключение из одного рабочего положения в другое происходит через предохранительные сопротивления без перерыва тока.

На современных электрических станциях и подстанциях для защиты трансформаторов вводятся реле перегрузки (максимальные реле) и аппараты для контроля нагрева масла. Как ни целесообразно применение этих аппаратов, все же они не дают полной защиты, потому что реле действуют только при большом увеличении силы тока после определенного установленного времени. Также для действия температурного сигнала требуется известное время, так как при каких-либо повреждениях нагревание масла не возрастает мгновенно до величины, необходимой для приведения в действие сигнала. Эти, хотя и весьма незначительные, промежутки вре-

мени, могут тем не менее оказаться роковыми для трансформатора, и разрушение обмоток за это время может получиться весьма значительным.

Если исходить из того положения, что повреждения внутри трансформатора не всегда тотчас же обнаруживаются значительным возрастанием тока или высоким нагревом в местах, доступных измерению, то выявляется некоторый пробел в полноте защиты употребительными аппаратами. Такой пробел заполняется защитным аппаратом Бухгольца (Buchholz).

Этот аппарат использует свойства масляного трансформатора образовывать газообразные продукты разложения при повреждении в любом месте вследствие высокого местного нагрева или электрического перекривия; газы в виде пузырьков поднимаются к защитному аппарату Бухгольца и побуждают его к действию. Таким образом, можно устранить опасность еще во время ее возникновения.

Конструктивное выполнение таково, что поднимающиеся газы, смотря по количеству их, заставляют подействовать либо только один сигнал, либо сигнал и выключающее реле. Аппарат вделывается в трубопровод, соединяющий трансформатор с консерватором масла.

д) Масло для трансформаторов и масляных выключателей.

Специальные минеральные масла, получаемые преимущественно из сырой нефти путем фракционной перегонки, являются главными, представителями трансформаторных масел и масел для масляных выключателей. По химическому составу они являются более или менее чистыми углеводородами. Свойством всех этих масел является отсутствие способности давать пену и отсутствие склонности соединяться при обычной температуре с кислородом воздуха, т. е. осмаливаться или уплотняться.

Минеральные дегти, образующиеся при сухой перегонке каменного угля в процессе получения газа, изолируют недостаточно и поэтому неприменимы для целей техники высоких напряжений. Парафиновое масло — открытая углеводородная цепь, получаемая как главная составная часть каменноугольного дегтя при его фракционной перегонке, несмотря на то, что оно является хорошим электрическим изолятором, идти для целей изоляции в технике благодаря высоколежащей точке застывания не может.

Если подвергнуть минеральное масло нагреву в течение продолжительного времени, то сперва отделяются невосгорающиеся пары; при дальнейшем нагревании, при известной температуре — температуре вспышки — при приближении пламени происходит легкая вспышка — с последующим потуханием паров, а при еще далее проводимом повышении температуры до температуры воспламенения масло впервые загорается длительно.

Температура отвердевания или застывания масла есть та температура, при которой при постепенном охлаждении масло теряет свое состояние жидкости и становится мажеобразным, уплотнившимся.

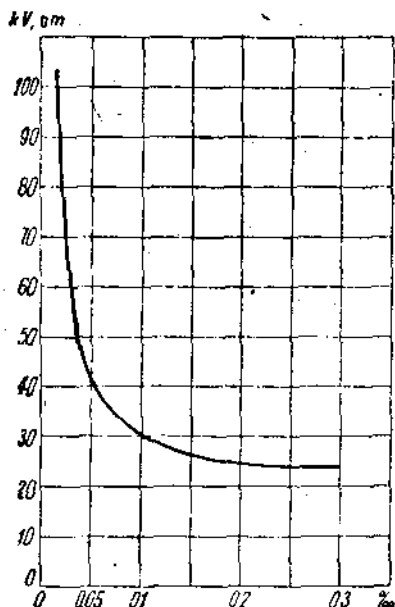
Вязкость масла определяется наблюдением времени вытекания определенного количества масла при определенной температуре через узкую трубку. Вязкость, измеренная в градусах Энглера (Engler), есть отношение времени вытекания масла ко времени вытекания воды при 20° С, наблюдаемое в Энглеровском аппарате.

Для определения этих четырех характерных величин предписано употребление аппаратов совершенно определенных размеров.

Дегтяное число есть количество дегтеобразных веществ в процентах, которое выделяется при 70-часовом нагревании масла до 120° при пропускании кислорода определенным способом.

Для изолирующих масел и масел для выключателей Союза электрических станций (vereinigung der Elektrizitätswerke) установил определенные границы, внутри которых должны лежать точки вспышки, воспламенения и застывания, равно как и вязкость и дегтяное число. Подобные масла подвергаются, помимо дистилляции, еще рафинированию, т.е. обработке серной кислотой для удаления асфальтовидных веществ.

Необычайное снижение электрической крепости с повышением влажности масла представлено кривой (фиг. 421). Из нее видно, что даже наилучшее масло практически непригодно, если оно в совершенстве не просушено. Эта чувствительность изолирующих масел по отношению к воде есть одно из неприятнейших свойств этих весьма ценных материалов. Но масло не только хорошо удерживает воспринятую влагу, но также и жадно



Фиг. 421. Пробивная крепость масла в зависимости от содержания воды.

поглощает влагу, и притом тем в более значительной степени, чем оно суше. Для удаления влаги масло проваривается при температуре не выше 120°C при атмосферном давлении или при вакууме около 300 миллиметров ртутного столба, или же при обычной температуре в фильтрпрессе прогоняется через ряд пачек фильтрованной бумаги, которая вследствие своей гигроскопичности воспринимает примесь влаги. Фильтрация нормально предшествует варке. Варка масла, однако, в особенности для аппаратов и трансформаторов, при коих должны быть обезвожены не только само масло, но и находящиеся в масле в больших количествах обмотки, укрепляющие и изолирующие детали (волоконные вещества), при первом пуске в работу (формирование) или после ремонта на этих частях, не может быть опущена.

Температура масла при заполнении масляных выключателей никоим образом не должна превосходить 40°C . Для трансформаторов заполняющее масло должно иметь температуру 120°C .

Варка масла с помощью нагреваемых электрическим током сопротивлений, сколь бы простой она ни казалась, должна производиться сугубо тщательно. Прежде всего, для уменьшения местного перегрева и подгорания масла, сопротивлений должны обладать достаточно большой поверхностью; далее, масло соответствующим приспособлением должно все время энергично перемешиваться.

Масловарки служат для выварки содержимого масляных трансформаторов, которые должны быть подготовлены к работе на месте установки. Далее, они с удобством применяются для варки масла для масляных выключателей и масла для заполнения трансформаторов, для промывки трубопроводов, охлаждающих рукавов, клемм с фарфоровыми деталями и для подогрева масла перед фильтрацией.

Смотря по местным условиям и по количеству подлежащего варке масла применяются электрические или паровые масловарки.

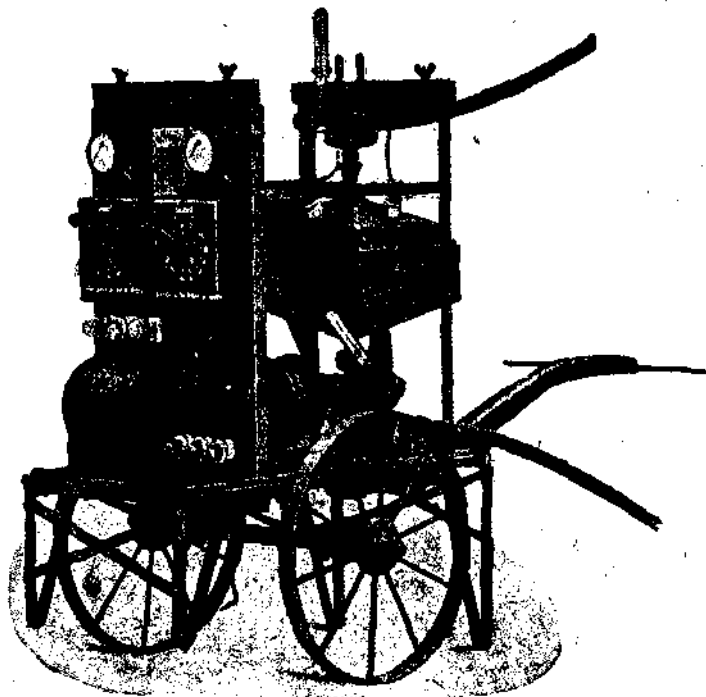
Варка производится следующим образом:

Масловарка с помощью трубопроводов соединяется с кожухом трансформатора или масляным баком, из которого подогреваемое масло нака-

чивается в нагревательный бак масловарки и обратно, так что получается циркуляция, и это продолжается до тех пор, пока не будет достигнута требуемая степень сухости.

В электрических масловарках масло прогоняется через котел с нагревающими сопротивлениями. В самых малых аппаратах циркуляция масла осуществляется с помощью ручных насосов, в прочих для этого служит приводимой электромотором центробежный насос.

Масловарки на 5000 и 10000 кг масла снабжаются эвакуирующим приспособлением, которое ускоряет испарение влаги и существенно уменьшает поглощение горячим маслом кислорода воздуха.



Фиг. 422. Электрическая масловарка на 5000 кг масла.

Все электроварки снабжаются предохранительными приборами, исключающими возможность перегрева масла.

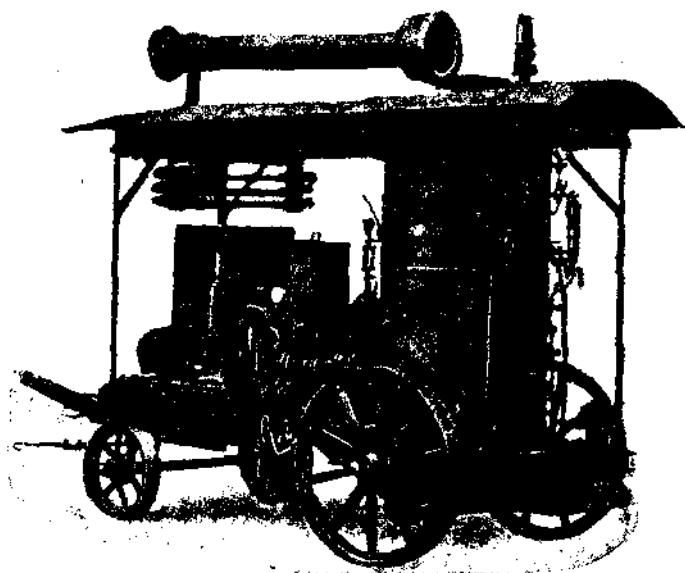
В паровых масловарках нагреваемое масло прогоняется через змеевик, вделанный в паровой котел. Тем самым, так как температура со всех сторон окружающего змеевика пара ограничена наибольшим давлением пара, возможность перегрева масла исключается (фиг. 423). Насос для прогона масла приводится паром и имеет вместе с воздушным насосом один общий поршневой шток.

Если в распоряжении имеется электрическая мощность по меньшей мере в 2 киловатта, то рекомендуется паровая масловарка с электронасосом. При этом циркуляционный и воздушный насосы приводятся электромоторами. Пар, необходимый для привода парового насоса, идет на подогрев масла (фиг. 423).

Вообще следует обратить внимание на то, что трансформаторы, содержащие волокнистые вещества (бумагу, хлопчатую бумагу, дерево и т. д.), при первом формировании должны быть проварены вместе с маслом,

а также и после этого, если по каким-либо причинам выявится возможность попадания в масло воздуха или влаги. В масляных выключателях или в уже формированных аппаратах, для которых нужен лишь продолжительный тщательный уход за маслом, достаточно лишь время от времени производить однократную или многократную фильтрацию масла вышеупомянутым фильтрпрессом.

Для установления содержания влаги в масле служат несколько способов: 1) Проба на „треск.“ Проба испытуемого масла нагревается в пробирке на бунзеновской горелке или на паяльной лампе до температуры около 120°C , при чем присутствие воды обнаруживается своеобразным потрескивающим звуком при малом влагосодержании, слышимым лишь при совершенной тишине в помещении. 2) Проба на пробой. Надежнейшее испытание хорошего состава масла дает электрическая проба масла на пробой с помощью специального испытательного прибора.



Фиг. 423. Паровая масловарка на 10 000 кг масла.

Самым тщательным образом должны быть удалены вода, волокна, грязь и ил [пропусканием масла через центрифуги (сепараторы)]. При этом масло подогревается лишь до 50°C . При более значительных количествах масла, так же как и при продолжительной работе, центрифугированию предшествует фильтрация. Сепараторами удастся удалить из масла вредные растворимые в воде кислоты и соли.

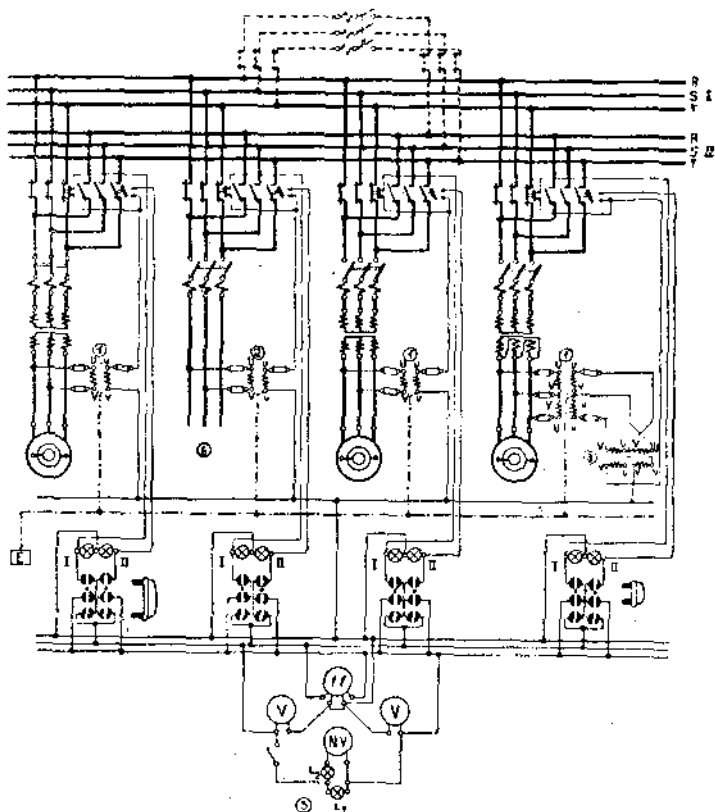
III. Схемы соединений.

а) Схемы соединений электрических станций.

Быстрое возрастание числа установок высокого напряжения дало такое же увеличение количества схем соединения, так что даже опытному проектирующему бывает трудно выбрать подходящую к данному случаю схему. Вопрос выбора одинарной или двойной системы сборных шин решается в основном в зависимости от того, допускает ли режим эксплуатации станции перерывы в работе. Двойные сборные шины требуются, когда

работа установки должна вестись двумя независимыми друг от друга группами.

Для крупных электрических станций предусматривается расположение нескольких комплектов сборных шин, к каждому из коих может быть приключен один генератор, и которые соединяются между собою через дроссельные катушки (реакторы). Генераторы по возможности соединяются с трансформаторами в общие единицы. Синхронизация на стороне низкого напряжения, в то время как включение на параллельную работу осуществляется на стороне высокого напряжения трансформаторов (фиг. 424).

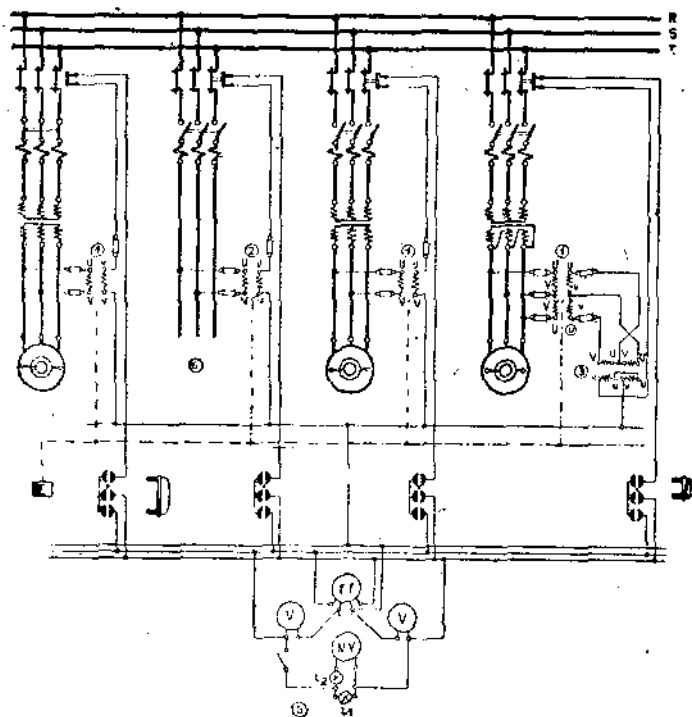


Фиг. 424. Параллельное включение генераторов в установках с двойными сборными шинами.

На более крупных станциях собственные нужды в целях сохранения независимости их снабжения должны питаться постоянным током, продолжительность подачи которого обеспечивается аккумуляторной батареей. Наиболее совершенным решением в этом отношении является установка постоянного тока, питаемая генератором с самостоятельным приводом, независимая от фидера собственных нужд ни электрически, ни механически. В турбогенераторах представляется целесообразным сцепление возбuditелей с главными силовыми агрегатами. Эти генераторы служат исключительно для возбуждения; для обслуживания собственных нужд предусматривается особая установка постоянного тока. Недопустима работа сцепленных с главными агрегатами возбuditелей на общие сборные шины, от которых берутся отводы на собственные нужды.

При параллельном включении целесообразно предусматривать синхронизацию между генераторами. Группа приборов, состоящая из двойного измерителя частоты, двух генераторных вольтметров, одного нулевого вольтметра и одной фазовой лампы, может быть, смотря по необходимости, применена в любом числе.

Приспособление для параллельного включения (фиг. 425) в установках с одинарными сборными шинами сохраняет также свою пригодность для случая, когда генераторы без промежуточного включения трансформаторов работают прямо на сборные шины. При разомкнутых треншальтерах размыкаются предусмотренные для этого вспомогательные контакты вспомогательной цепи для параллельного включения.



Фиг. 425. Параллельное включение генераторов в установках с одинарными сборными шинами.

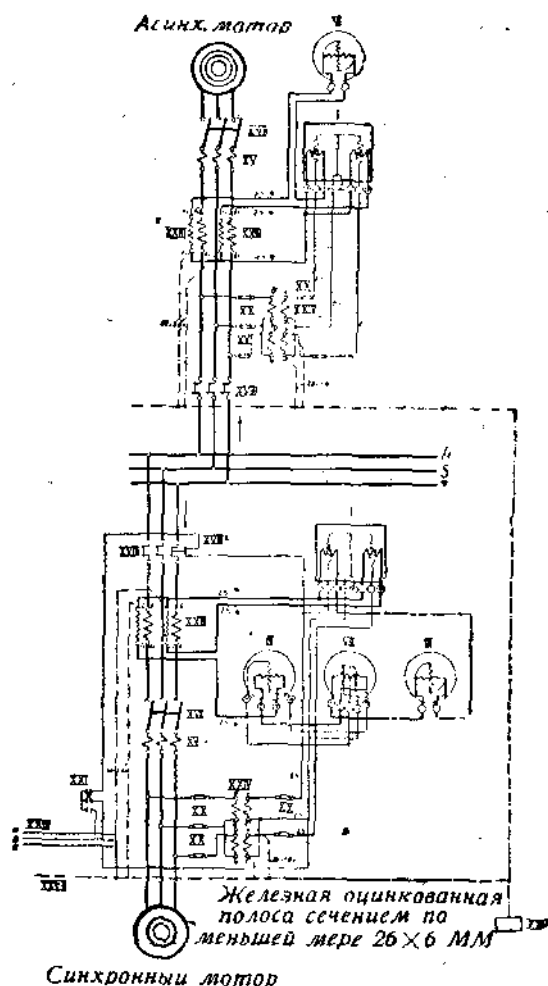
Схемы соединения для аппаратуры годны как для электрических станций, так и для подстанций. Аппаратура может быть подразделена на следующие группы:

1. Аппаратура для генераторов.
2. " " трансформаторов.
3. " " измерения изоляции.
4. " " связи.

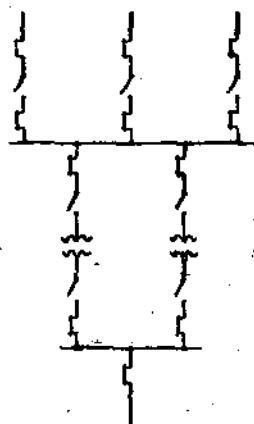
На отдельных деталях этих схем останавливаться мы не будем и ссылаемся на прилагаемую общую схему (фиг. 426).

б) Схемы соединений подстанций.

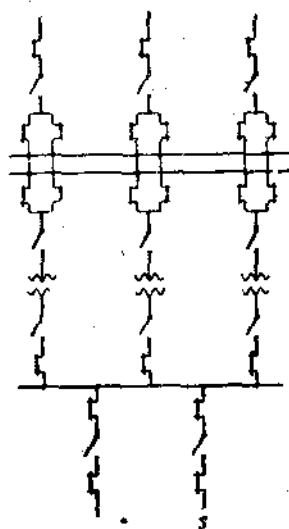
Для подстанций применение одинарных или же двойных сборных шин также определяется допустимостью перерывов в работе. Смотри по тому, находится ли подстанция в конце линии или же линия проходит через нее, различают головные и промежуточные подстанции, два типичных примера которых дают фиг. 427 и 428.



Фиг. 426. Схема соединения.



Фиг. 427. Схема соединения конечной подстанции.



Фиг. 428. Схема соединения промежуточной подстанции.

IV. Распределительные устройства.

а) Элементы распределительных устройств.

Распределительные устройства низкого напряжения имеют применение на станциях трехфазного тока для промышленных установок. Они выполняются, аналогично распределительным устройствам постоянного тока, на распределительных щитах.

В распределительных устройствах высокого напряжения следует разделять помещения собственно высокого напряжения от помещения управления.

Требования, предъявляемые к распределительным устройствам высокого напряжения, непрерывно возрастают с повышением мощности и напряжения. Применяемые в этих установках распределительные, измерительные и предохранительные аппараты должны удовлетворять следующим двум основным положениям:

1) Механическая прочность всех частей должна увеличиваться в соответствии с мощностью короткого замыкания работающих на станции генераторов.

2) Степень надежности в электрическом отношении должна быть достаточно большой, дабы установка не испытывала никаких повреждений также и при происходящих перенапряжениях.

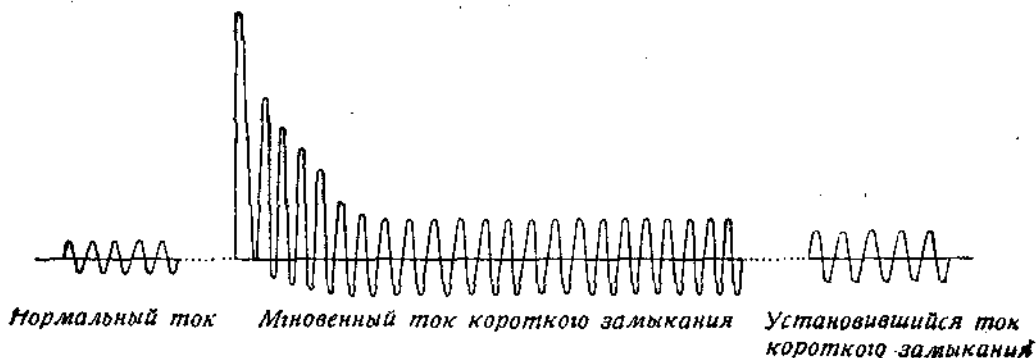
Наиболее ответственными частями распределительных устройств являются масляные выключатели (фиг. 429).

Автоматические максимальные выключатели должны быть в состоянии свободно выключить полную мощность короткого замыкания данной установки. Величина выключателя определяется не только высотой напряжения и силой рабочего тока, но также и мощностью всей установки и длиной подводных проводов к данному выключателю.

Следует упомянуть о том, что ток в генераторе при внезапном коротком замыкании возрастает до максимального значения, в 15—20 раз превосходящего нормальную силу тока (фиг. 430), и после этого, сперва быстро, затем медленнее падает до установившегося тока короткого замыкания, соответствующего возбуждению генератора и сопротивлению в коротко-замкнутом контуре; ток установившегося короткого замыкания в тихоходных машинах равен приблизительно трехкратному нормальному току, в то время как у машин с высоким числом оборотов он редко превосходит последний более, чем в 1,2 раза.

Фиг. 429. Масляный выключатель высокой мощности.

Это максимальное значение благодаря крайне малой продолжительности действия не вызывает опасного нагревания, но мгновенный ток короткого замыкания создает весьма высокие динамические усилия в об-



Фиг. 430. Процесс изменения тока короткого замыкания.

мотках машин и в самих выключателях. Обмотки машин должны быть защищены от этих усилий прочными укрепляющими конструкциями, а также и выключатели должны конструироваться механически прочными.

В отношении автоматического выключения различают прямое и косвенное выключение. В то время, как в первом случае два или три разме-

щенных на выключателе электромагнит непосредственно производят выключение, при косвенном выключении на масляном выключателе находится только один выключающий механизм, который через особое передающее устройство работает от источника тока низкого напряжения.

Каждый из этих двух видов выключения, смотря по конструкции выключающих или передающих механизмов, может быть приспособлен к:

1) Мгновенному выключению. Выключатель размыкается мгновенно, как только сила тока превзойдет установленную максимальную величину.

2) Выключение с выдержкой времени. Здесь следует различать зависимую, независимую и полузависимую выдержку времени.

а) Зависимая выдержка времени меняется в зависимости от чрезмерного тока, обратно пропорционального последнему. При очень больших перегрузках время выключения весьма мало. Вследствие этого при коротком замыкании действуют все последовательно включенные магниты, даже если они выбраны на разные установки тока и времени. Если еще применены различные конструкции с зависимой установкой времени в последовательном соединении, то получается еще больше затруднений, так как выключатели функционируют совершенно произвольно.

б) Независимая установка времени обеспечивает в каждом случае одну и ту же выдержку времени выключения, независимо от того, превзойден ли предельный ток лишь незначительно, или же во много раз. Замедление производится с помощью заводного механизма. Каждый выключатель снабжается пристроенным замедляющим приспособлением, или же на проводах находятся выключающие приспособления, действующие совместно на один отдельно расположенный замедляющий аппарат (реле времени). Последний по истечении установленного времени выключения заставляет подействовать включающий механизм, установленный на выключателе. Независимая установка времени, таким образом, сложнее и дороже, чем зависящее от времени выключение, но оно дает большую надежность в работе.

в) Полузависимая выдержка времени дает при установленном номинальном токе большое замедление, при возрастающих силах тока более короткие промежутки времени выключения и, наконец, при больших перегрузках значения времени, более уже не зависящие от величины перегрузки. Подобным ограниченно-зависимым реле времени является Dosep — реле заводов Симменс-Шуккерта, при котором установленное время уменьшается тем значительно, чем больше чрезмерный ток. Время выдержки падает до половины, когда чрезмерный ток достигает упятеренной величины номинального тока. Если же ток возрастает свыше этого значения, то время выключения остается уже независимым от силы тока. Время выключения в этом случае, таким образом, даже при коротком замыкании не равно нулю.

Полузависимая установка времени дает возможность при незначительных, малой продолжительности и поэтому неопасных перегрузках избежать перебоев в работе и исключает возможность выключения при коротких замыканиях на больном участке сети, так как замедление при коротких замыканиях можно установить на некоторую небольшую фиксированную величину.

Конструктивное выполнение масляного выключателя стремится все к более однообразным формам (фиг. 431). Для определения размеров выключателей и расстояний между токоведущими частями Союз германских электротехников (VDE) устанавливает соответствующие нормы.

Как правило, для напряжений до 35 000 вольт применяются однокожуховые выключатели. Выключатели в установках большой мощности,

на которых следует ожидать значительных и частых коротких замыканий, целесообразно выполнять с изолирующими приспособлениями, устраняющими перебрасывание вольтовой дуги между фазами или с фазы на землю.

Несмотря на то, что масляный выключатель даже с точки зрения надежности в эксплуатации во всех обстоятельствах предпочтительнее плавких предохранителей, то все же из экономических соображений во многих случаях избирается применение предохранителей.

Целесообразно рассчитывать плавкие предохранители для включения на стороне высокого напряжения трансформаторов на четырехкратный рабочий ток. Предохранители менее чем на 4 ампера не должны применяться ввиду легкой повреждаемости механическими или химическими воздействиями.

Напротив, предохранители на стороне низкого напряжения должны выбираться в соответствии с нормальным током. Предохранители низкого напряжения должны защищать трансформатор от перегрузки, а предохранители высокого напряжения — всю установку от короткого замыкания в соответствующем трансформаторе.

Дроссельные катушки (реакторы) рекомендуются для ослабления токов короткого замыкания, если разрывная мощность масляного выключателя недостаточна.

У генераторов дроссели безусловно не следует применять, даже в крупных машинах, ибо ток короткого замыкания не превосходит 15-кратного нормального.

При помещении реактивных катушек в рассечку сборных шин более значительных электростанций они дают преимущество только в том случае, если раздельно работающие отрезки шин должны быть соединены с целью выравнивания нагрузок. Существенную пользу приносят реакторы в питающих проводах, если некоторые из них

Фиг. 431. Масляный выключатель.

питаются от тех же сборных шин или присоединяются к той же подстанции. Реакторы необходимы при параллельной работе крупных станций. В особенности, должны быть защищены кабели от повреждения значительными токами короткого замыкания.

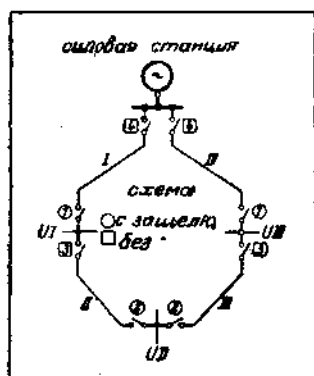
б) Защита от аварийных токов.

Защита от аварийных токов может и не устранить самый дефект, но защитные приспособления служат лишь для того, чтобы выделить повреждения, т.е. отключить дефектный провод с обоих концов. Дефектный участок системы должен изолироваться самим аварийным током при помощи защитных устройств без того, чтобы нарушалась работа в остальной части установки (селективность действия). Смотря по типу установок, применяются различные системы селективной защиты. Для кольцевых и разветвленных сетей служит так называемая кольцевая защита Бауха (Bauch) с инверсивной (изменяющейся во встречном направлении), независимой градацией времени выдержки реле. Как видно из фиг. 432,

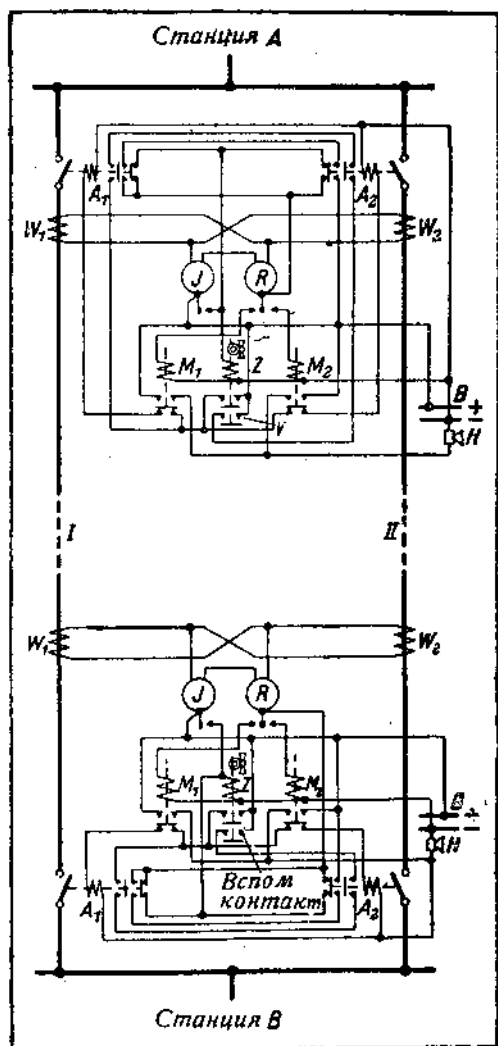
выдержки подбираются таким образом, что дефектный участок отключается всегда через наивозможно кратчайший промежуток времени¹⁾. Это достигается тем, что с помощью реле направления блокируются все выключатели здоровых проводов, через которые при аварии энергия идет из линии к сборным шинам. Незаблокированные выключатели линий располагаются с такой градацией выдержек времени, что ближе всего лежащий к месту аварии выключатель имеет кратчайшую выдержку времени. С помощью независимой установки выдержки времени эти последние фиксируются жестко, так что даже в относительно сложных сетях происходит правильное селективное отключение дефектных участков.

Для двух параллельно включенных линий применяется балансовая защита (система Бауха). Она основана на том, что в параллельных линиях токи при нормальной работе равновелики, при аварии же различной силы и эта асимметрия токов используется для отключения поврежденного участка.

Фиг. 433 дает в однолинейном изображении принцип включения защитных устройств. Реле направления здесь включены таким образом, что в случае повреждения выключатели здорового провода бло-



Фиг. 432. Кольцевая защита с инверсивной градацией.



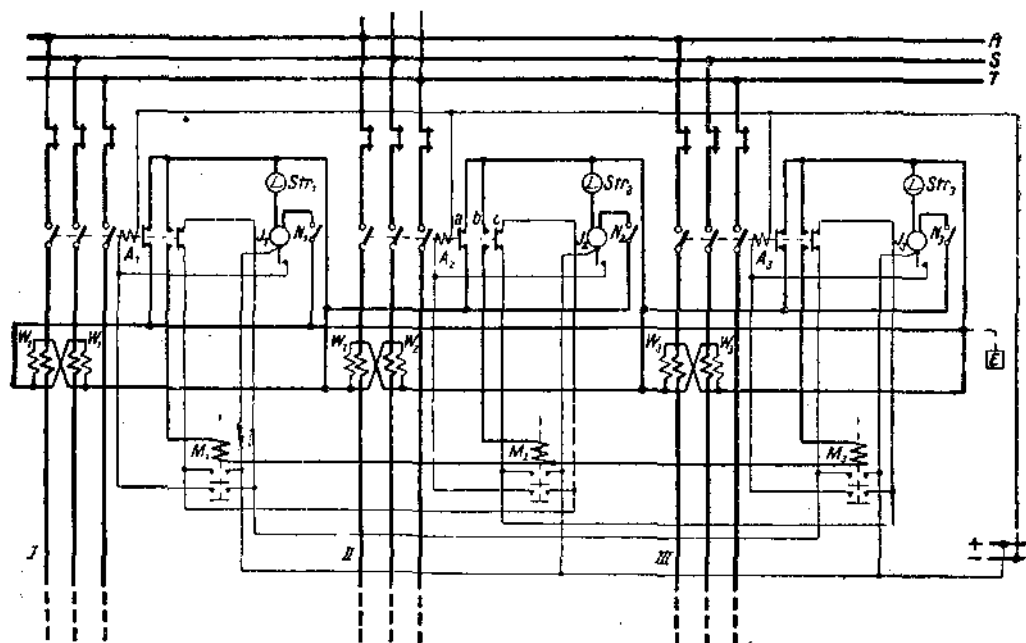
Фиг. 433. Балансовая защита по Бауху для двух параллельных линий.

А—выключатель; В—источник постоянного тока; Н—сирена; Ж—максимальное реле тока; М—промежуточное реле; В—реле направления; W—трансформатор тока; Z—реле времени.

кируются. Последний по выключении дефектного провода остается далее селективно защищенным и градация выдержек его автоматически связывается с градацией прочих участков сети. Защита действует подобно дифференциальной, однако вспомогательные провода между станциями отпадают.

¹⁾ Цифры при реле на схеме— время выдержки.

На том же принципе равенства токов основана полигонная защита Бауха для защиты параллельно работающих линий, числом более двух (фиг. 434). Вторичные обмотки трансформаторов тока, защищаемых линий, соединены навстречу друг другу, образуя многоугольник. К углам его приключаются реле, из которых в случае повреждения всегда приходят в действие два. Особым симметричным включением контактов этих реле осуществляется селективное отключение поврежденного участка. Защитное устройство отключает каждый поврежденный участок при наступлении короткого замыкания, земляного замыкания или обрыва провода. Если из параллельных линий осталось в работе только две, то при следующем повреждении они обе отключатся вместе. Это допустимо, так как одна



Фиг. 434. Полигонная защита для нескольких параллельных линий.

A — выключатель катушки; J — максимальное реле тока; N — реле тока; N_0 — выключатель максимального реле; Str — амперметр; W — трансформатор тока.

линия все равно не в состоянии передавать ту нагрузку, которую ранее передавали три или более параллельные линии. В некоторых случаях желательно все же еще иметь селективность и при работе лишь двух последних линий; это достигается введением в полигонную схему реле направления. Если земляные замыкания должны только указываться, то каждая линия снабжается реле заземления.

Вышеприведенные три системы селективной защиты дают даже для сложнейших сетей безукоризненную защиту против аварийных токов. В последнее время появились также другие системы, преследующие ту же цель и производящие отключение повреждения не только в зависимости от токов, но также от напряжений или от токов и напряжений одновременно. Эти системы обнаруживают много недостатков, так что развитие их не может еще считаться законченным.

с) Защита от перенапряжений.

Под перенапряжением понимается такое повышение напряжения, которое, превышая нормальное рабочее напряжение, угрожает непрерывности работы и целостности установки. Перенапряжения в электрических

установках возникают в первую очередь вследствие атмосферных влияний, например гроз, вследствие чего установки с воздушными линиями всегда подвержены большей опасности, чем с чисто кабельными сетями. Дальнейшей причиной возникновения перенапряжений является, между прочим, образование дефектов изоляции (земляные замыкания и внезапные нарушения состояния электрического равновесия), которые могут наступить при ошибочных включениях или при включении или отключении больших частей установки. Так как в настоящее время в общем нет ясности в вопросах возникновения перенапряжений и явлений, имеющих место в процессе их протекания, то вследствие этого мнения о целесообразности применения защитных аппаратов для борьбы с перенапряжениями представляются весьма разноречивыми. Несмотря на сравнительно высокую степень надежности (коэффициент запаса прочности) современных установок, производившиеся до сего времени исследования дают возможность заключить, что одной этой надежности недостаточно для предотвращения повреждений. Применение защитных аппаратов во многих случаях представляется необходимым.

Против прямых ударов молнии защитных средств не существует, однако же, специальными защитными мероприятиями возможно ограничить размеры повреждений настолько, что получается возможность произвести ремонт быстро и без больших затрат.

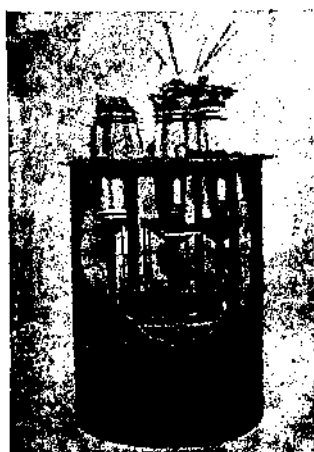
Для отведения электрических зарядов, возникающих в воздушных сетях под влиянием атмосферных явлений, применяется постоянное соединение линейных проводов или нулевой точки трехфазной системы с землей посредством сопротивлений с высоким омическим сопротивлением (заземляющие сопротивления), или же через сопротивления с высокой индуктивностью (заземляющие катушки).

Для обезвреживания перенапряжений другого вида нашла широкое применение роговая защита. При этой системе энергия перенапряжений преобразуется в форму энергии, не опасную для установки — в тепло. Для этого служат демпфирующие сопротивления, величина омического сопротивления коих выбирается равной величине волнового сопротивления линии. Последнее для воздушных линий имеет порядок около 500—800 ом¹⁾. Целью самого рогового разрядника при этом является лишь автоматическое приключение демпфирующих сопротивлений при возникновении перенапряжений и также автоматическое отключение их от сети по миновании перенапряжения посредством гашения вольтовой дуги. Чем выше рабочее напряжение, тем труднее иметь величину демпфирующего сопротивления порядка волнового сопротивления, ибо, с другой стороны, энергия дуги, образующейся на рогах, должна держаться в определенных границах. Это затруднение повело к появлению различных форм выполнения защитных разрядников. В защите Бендманна (Bendmann) дуга тотчас после перекрытия искрового промежутка гасится коротким замыканием ее в масле. Время нагрузки и размеры сопротивлений при этом получаются незначительными. Применение четвертого сопротивления между нулевой точкой соединенных звездой сопротивлений и землей оказывает, однако, неблаго-

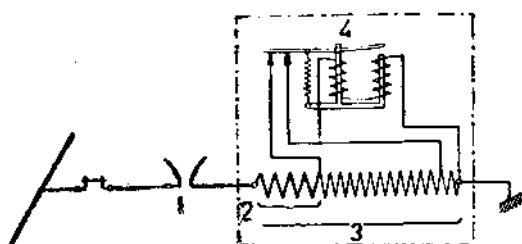
¹⁾ Волновое сопротивление воздушной линии может быть легко подсчитано по выведенной мною формуле:

$$W = 140 \cdot \left(\lg d + \frac{1}{2} \cdot \lg q - \frac{1}{4} \right),$$

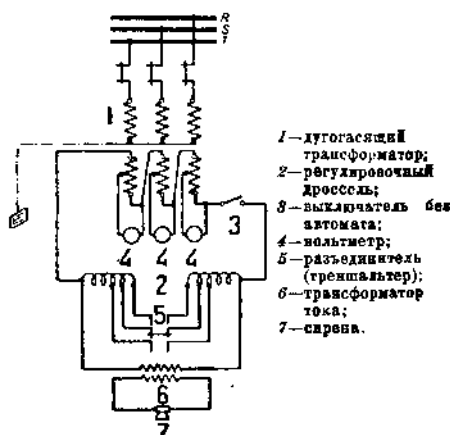
где W — волновое сопротивление в омах, d — расстояние между проводами в мм (в случае несимметричной трехфазной линии — среднее геометрическое), q — сечение проводов в мм².
Б. Тареев.



Фиг. 436. Пятироговая защита с приключением сопротивлений для 24 kV.



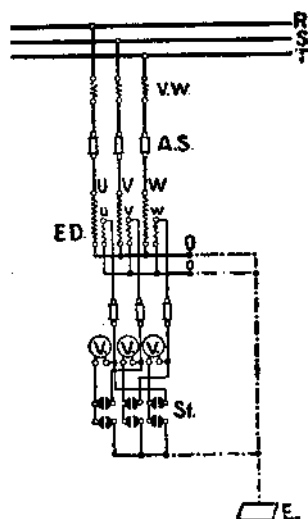
Фиг. 435. Роговая защита с комбинированными добавочными сопротивлениями.



Фиг. 437. Схема включения дугогасящего трансформатора.



Фиг. 438. Дугогасящий трансформатор с регулирующим дросселем и масляным выключателем.

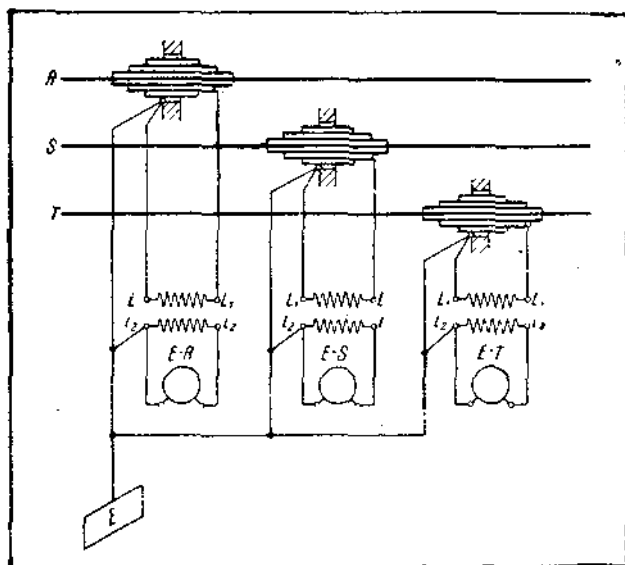


Фиг. 439. Заземляющая дроссельная катушка с тремя вольтметрами.

приятное влияние на полное сопротивление по отношению к земле. Предпочтительнее применение комбинированного добавочного сопротивления (фиг. 436), при котором перенапряжения воспринимают сперва меньшим сопротивлением, а через короткое время после образования дуги автоматически приключается высокое сопротивление и дуга ограничивается известными пределами (фиг. 435).

Применяемая в некоторых случаях конденсаторная защита по сравнению с роговой защитой имеет весьма малое значение.

Для защиты обмоток трансформаторов и машин от проникновения перенапряжений перед ними во многих случаях включаются защитные дроссельные катушки, ибо не всегда возможно выполнить изоляцию обмотки так, чтобы она надежно противостояла перенапряжениям. Защит-



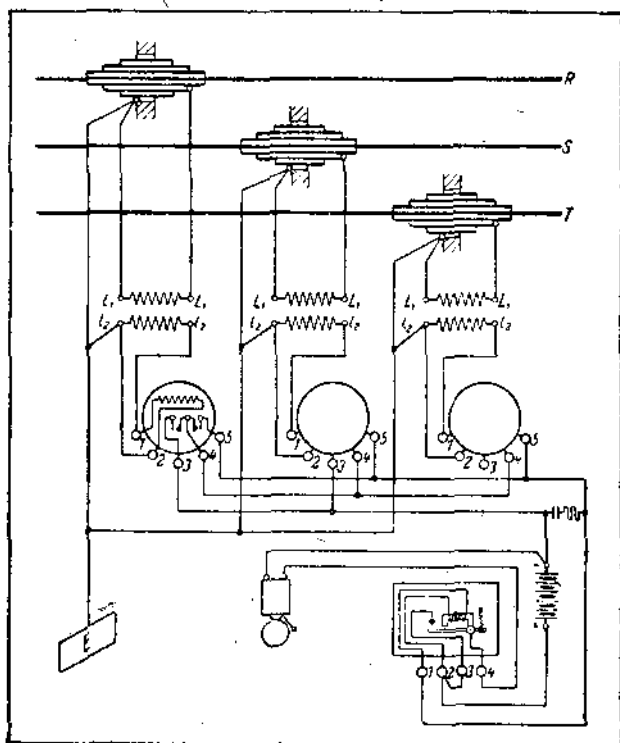
Фиг. 440. Измерение заземления на конденсаторных вводах.

ные дроссельные катушки действуют как волноломы, так как они частично сглаживают фронты проходящих блуждающих волн и тем самым снижают величину напряжения между соседними витками обмотки, частично же отражают волны обратно в сеть, где волны рационально воспринимаются и ликвидируются разрядниками.

В заключение, должны быть названы еще компенсаторы заземления, применяемые как предупредительное средство от тех перенапряжений, которые возникают в результате заземлений. Эти аппараты посылают в поврежденное место ток, равный по величине току заземления сети, но противоположно ему направленный. Оба тока взаимно уничтожаются, так что возможность образования дуги в месте заземления и связанных с этим повреждений значительно уменьшается.

К этим аппаратам в числе других относятся дугогасящий трансформатор Бауха и заземляющая катушка Петерсена (Petersen). Дугогасящий трансформатор Бауха (фиг. 437 и 438) представляет собой индуктивное заземление, независимое от трансформатора сети. Для этой цели нулевая точка обмотки высокого напряжения трансформатора Бауха соединена с землей.

Вторичная обмотка, соединенная открытым треугольником, включается на легко регулируемый дроссель с помощью трещалтера. Заземляющая катушка Петерсена представляет собою, напротив, индуктивное заземление нулевой точки, приключаемое к нулевой точке трансформаторов сети. Последние должны для этой цели удовлетворять особым условиям, если нежелательна установка специального трансформатора. Регулировка катушки Петерсена осуществляется с помощью ответвлений от ее обмотки.



Фиг. 441. Присоединение указателя заземления к конденсаторным вводам.

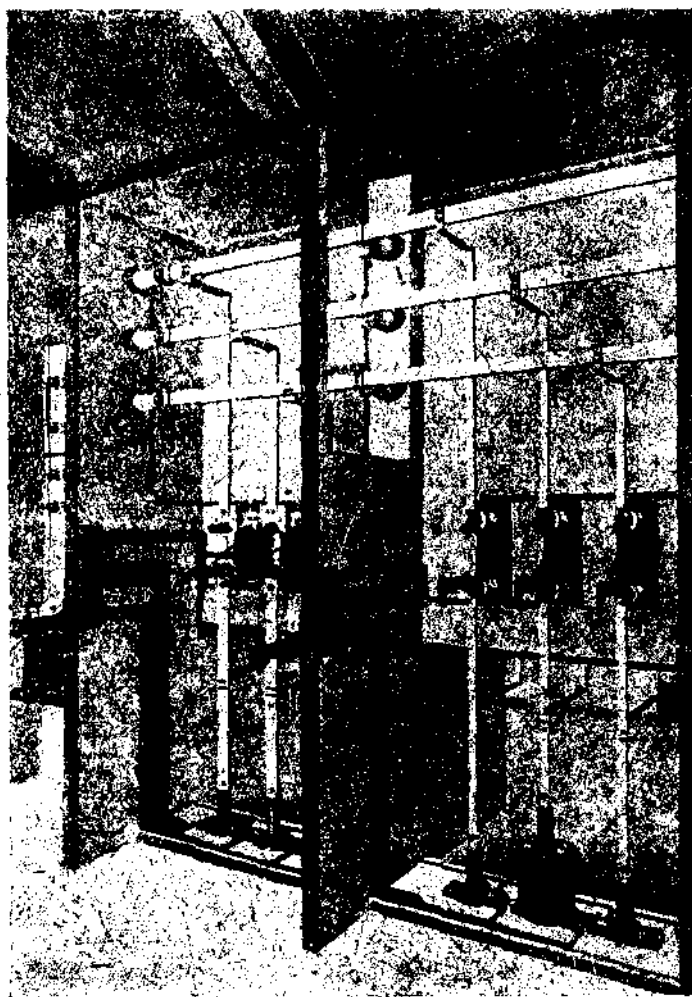
Как указатели заземления применяются вольтметры, включаемые по схеме фиг. 439. При этом расположении также может быть приключена сирена, которая обращает внимание более или менее сильным, смотря по величине повреждения, гудением. При более высоких напряжениях измерительные трансформаторы могут присоединяться к слоевым обкладкам конденсаторных вводов (фиг. 440 и 441).

д) Выполнение распределительных устройств.

В первых установках для передачи энергии ток подводился к сборным шинам коротким путем через предохранители, выключатели и измерительные инструменты, а оттуда через предохранители распределялся по отдельным питательным проводам.

Однако, в последние годы в построении распределительных устройств произошел полный переворот. Распределительное устройство представляет теперь одну из важнейших частей электрической станции и уже при

проектировании всей установки эта часть требует особого внимания. Для определения безопасных расстояний служат предписания VDE, дающие минимальные размеры для изоляции и для проходов для обслуживания. Таким образом, размещавшиеся у стены распределительные щиты превратились в обширные многоэтажные здания, превосходящие размерами машинные помещения. Подобные установки представляют собой дорого-



Фиг. 442. Ячейки сборных шин.

стоящие сооружения, которые все же в целях надежности в работе для средних и больших электрических станций и подстанций должны быть признаны необходимыми.

Основой для построения каждого распределительного устройства является схема соединений. При ее проектировании встает вопрос о выборе одинарной или двойной системы сборных шин. Одиакрные сборные шины применяются лишь в установках малой мощности, если возможны временные—например, в воскресные дни—перерывы в работе; в установках более значительной мощности, работающих непрерывно, всегда следует

выбирать двойные сборные шины, которые при очень больших установках целесообразно еще подразделять.

Чтобы смотря по требованиям эксплуатации возможно было соединять без перебоев в работе разделенные сборные шины, необходимо применение соединительных выключателей (купельшальтеров). Часто применявшиеся ранее кольцевые сборные шины ныне почти совершенно оставлены.



Фиг. 443. Ячейки масляных выключателей.

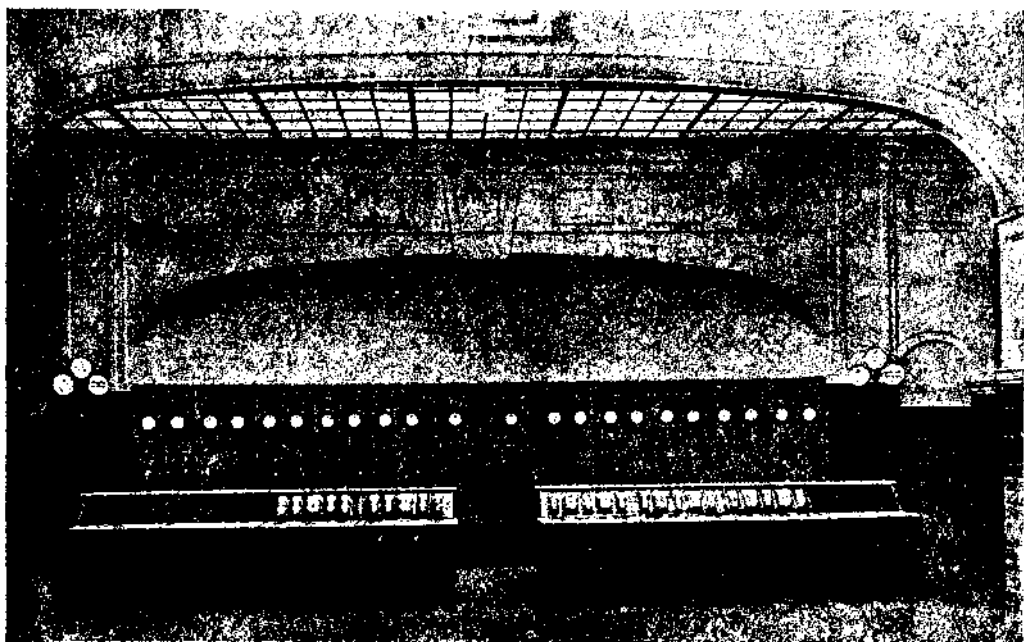
В Германии чаще всего выбирается выполнение распределительных устройств по ячейковой системе.

Распределительное устройство состоит из ячеек сборных шин, масляных выключателей и различных аппаратов (фиг. 442 и 443).

Следует обратить сугубое внимание на то, чтобы сборные шины были отделены от аппаратов, содержащих масло и изолирующие массы.

Масляные выключатели располагаются чаще всего в открытых камерах, выходящих в общий коридор обслуживания, при чем помещение масляных выключателей отделено от прочих помещений высокого напря-

жения. На больших станциях помещение масляных выключателей разделяется на несколько групп, чтобы ограничить могущее произойти образование дыма. При весьма значительных мощностях масляные выключатели размещаются в замкнутых ячейках, расположенных у внешней стены здания распределительного устройства. Этот тип выполнения является обычным в некоторых районах средней и южной Германии также и для меньших мощностей. Часто предпочитают такие устройства, в которых из коридора обслуживания масляных выключателей видны сборные шины и треншальтеры перед последним. Это расположение дает известные преимущества в их эксплуатации, так как при манипуляциях переключения возможно прямое сообщение между помещением сборных шин и треншальтеров и коридором обслуживания масляных выключателей.



Фиг. 444. Распределительный щит и пульта.

В последнее время проводится выполнение распределительных устройств в виде зала (Hallenordnung), когда преимущества открытого расположения аппаратуры в зале соединяются с преимуществами расположения в ячейках. Масляные выключатели располагаются в подвешенном состоянии, для чего под залом высокого напряжения предусматривается специальное помещение, имеющее выходы наружу. Внешняя стена здания в этом помещении выполняется из отдельных колонн. Крышки масляных выключателей выполняются механически значительно более прочными, чем кожуха их, вследствие чего при недопустимом повышении давления в масляном выключателе кожух выбрасывается наружу, дым свободно выходит, не нарушая работу установки высокого напряжения, и опасность для обслуживающего персонала устраняется. Для осмотра масляного выключателя масляный бак его опускается с помощью специальной тележки, после чего все части масляного выключателя становятся легко доступными осмотру. Следующее преимущество этого расположения состоит в том,

что у смонтированного выключателя при опущенном кожухе может производиться включение, дающее возможность наблюдать, как работают контакты.

Помещение управления распределительного устройства электрической станции должно быть прежде всего отделено от помещений высокого напряжения. На маленьких электрических станциях передняя стена ячеек масляных выключателей используется для размещения измерительных и защитных аппаратов в целях удобства наблюдения. В распределительных устройствах большего размера приходится выделить особое помещение управления, из которого производится управление всеми выключателями на расстоянии (фиг. 444).

На электрических станциях значительной мощности помещение управления обычно образует промежуточную часть между машинным и распределительным помещениями. В этом помещении управления инструменты и коммутаторные приборы обслуживающего тока для генераторов располагаются обычно на распределительных пультах, а приборы для фидеров — на распределительных щитах.

Открытые распределительные устройства (Freiluftanlagen) за последние годы были введены в большом количестве, в особенности за границей, так же как и в некоторых установках, сооруженных в Германии. Установка аппаратуры на открытом воздухе, вообще говоря, представляется экономичной лишь для напряжений, начиная приблизительно от 50 kV и выше, однако же, есть случаи, когда открытые установки рекомендуются и для более низких напряжений.

Построение открытых подстанций определяется следующими мотивами: дорогие строительные материалы, высокая стоимость производства работ, плохой грунт, необходимость в тяжелых и дорогих фундаментах, удаленность места постройки от места получения строительных материалов, удорожающая транспорт их, возможность землетрясений (как, например, в Японии), и т. д.

Условиями для построения открытых подстанций являются располагаемый достаточно большой участок земли и местонахождение станции вдали от промышленных центров, предприятия которых образуют много дыма и где значительное оседание угля и потери на изоляторах образует проводящий слой. Температура воздуха имеет меньшее значение, так как для холодных стран может доставляться масло для выключателей и трансформаторов, которое еще не застывает при приблизительно — 35° C.

Решение расположить распределительную аппаратуру внутри здания или же на открытом воздухе должно быть, таким образом, принято отдельно для каждого случая в зависимости от местных условий.

Дальнейшие подробности — см. раздел D.

D. Общее расположение электрических станций и подстанций.

I. Электрические станции.

План электрической станции находится в зависимости от последовательности в процессе преобразования энергии с учетом местных условий (подвоз топлива, водоснабжение). Наглядное внутреннее расположение должно быть заметно и по внешней группировке зданий. Органически распределительное здание должно следовать за машинным помещением, а это последнее за котельной. Здесь инженер-энергетик и архитектор должны работать рука об руку, чтобы удачно соединить все части в одно целое.

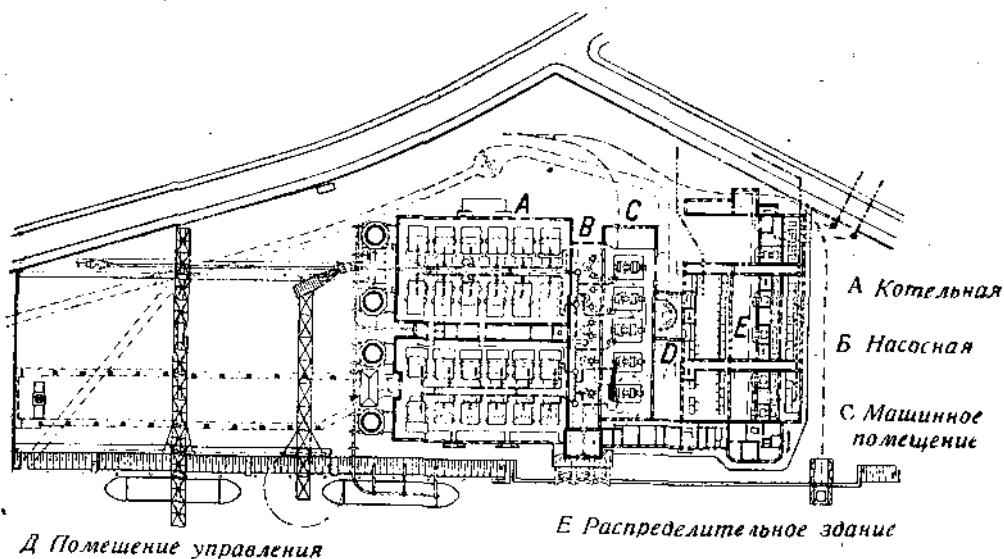
При целесообразном расположении плана и выборе надлежащих соотношений здания производят высоко художественное впечатление (фиг. 445).



Фиг. 445. Вид большой электрической станции.

а) Паровые электрические станции.

Электрическая станция Тифстак (Tiefstack) Гамбургского Об-ва электрических станций является типичным примером станции со сжиганием каменного угля (фиг. 446). Станция построена на берегу Морфлетского канала Эльбинской системы. На чертеже слева изображена площадь, слу-



Фиг. 446. План большой электрической станции.

жащая складом угля, с транспортной установкой в виде двух мостовых кранов для перегрузки угля и двух ковшевых конвейеров производительностью соответственно 60 и 30 тонн угля в час. Наклонная эстакада служит для разгрузки подвозящих уголь судов. Угольная площадь

приспособлена для принятия 36 000 тонн угля. Перед котельной стоят 4 дымовых трубы с диаметром в свету выходного отверстия 4,5 м и высотой 103 м. Котлы 14 атмосфер, поверхность нагрева по 600 м² расположены в 4 ряда по 6 в каждом. Каждый ряд котлов работает совершенно независимо от остальных. Между котельной и машинным зданием находится насосное здание для питательных насосов котлов и конденсатных и воздушных насосов для поверхностных конденсаторов. В машинном здании установлены 2 генератора мощностью по 10 000 kVA и 3 по 25 000 kVA. Далее следует мостик управления между машинным и распределительным зданиями (фиг. 447).



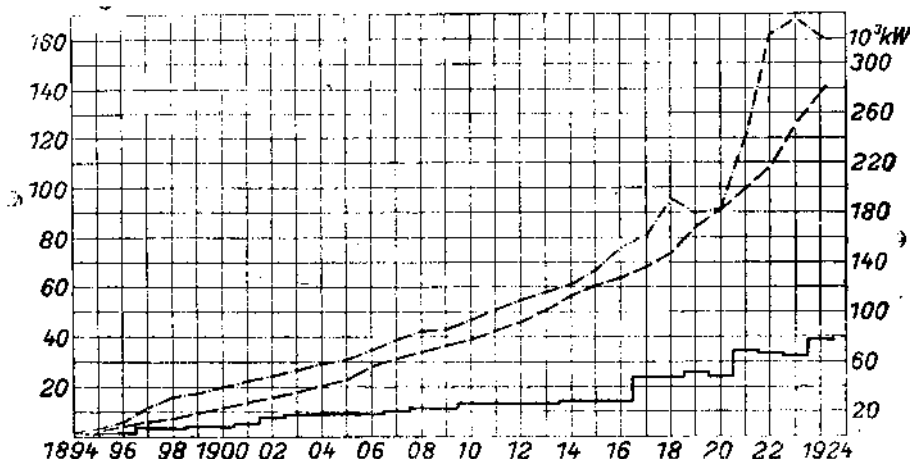
Фиг. 447. Помещение щита управления.

Распределительное устройство предусмотрено обычного типа, ячейковой системы, для напряжения машин в 6 000 вольт и напряжения для распределения энергии 25 000—30 000 вольт. Свободное сообщение между отдельными частями здания при помощи рельсового пути облегчает транспорт оборудования.

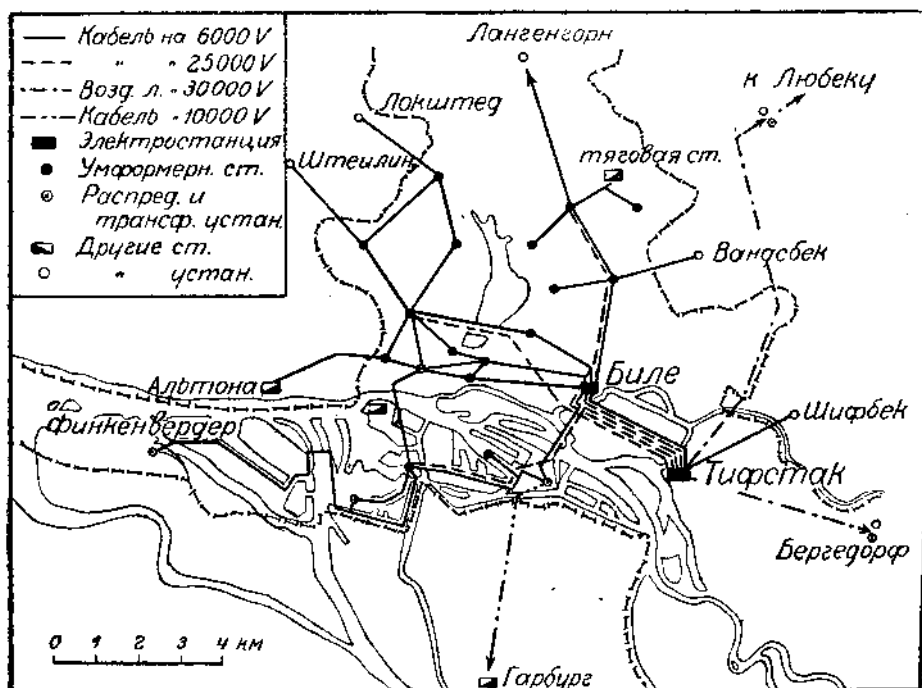
Развитие Гамбургских электрических станций за годы с 1894 по 1924 (фиг. 448) показывает рост приключенной мощности. План сети района дан на фиг. 449. Одновременное присоединение сети к соседним электрическим станциям—Альтона, Гарбург, Любек, Бергедорф и подвесной железной дороги дает гарантии взаимной поддержки и повышает надежность работы. Трансформация вырабатываемого трехфазного тока на различных подстанциях будет еще описана далее.

Районная электрическая станция „Fortuna II“ (фиг. 445) может служить примером станции на буром угле. Эта станция запроектирована на полную мощность в 160 000 kW, при чем предусмотрено еще дальнейшее повышение мощности до 200 000 kW. В настоящее время установлено 6 турбоагрегатов мощностью по 16 000 kW при $\cos \varphi = 0,7$ и 1500 оборотах в минуту. Турбины работают при начальном давлении пара 14,5 at и темпера-

туре пара 325—350° С. Каждая турбина имеет конденсационную установку, состоящую из двух поверхностных конденсаторов по системе противотока и необходимых насосов для охлаждающей воды и конденсата. Генераторы вырабатывают трехфазный ток 6 300 вольт и 50 периодов. Энергия подво-



Фиг. 448. График развития Об-ва Гамбургских электрических станций.



Фиг. 449. План сети Об-ва Гамбургских электрических станций.

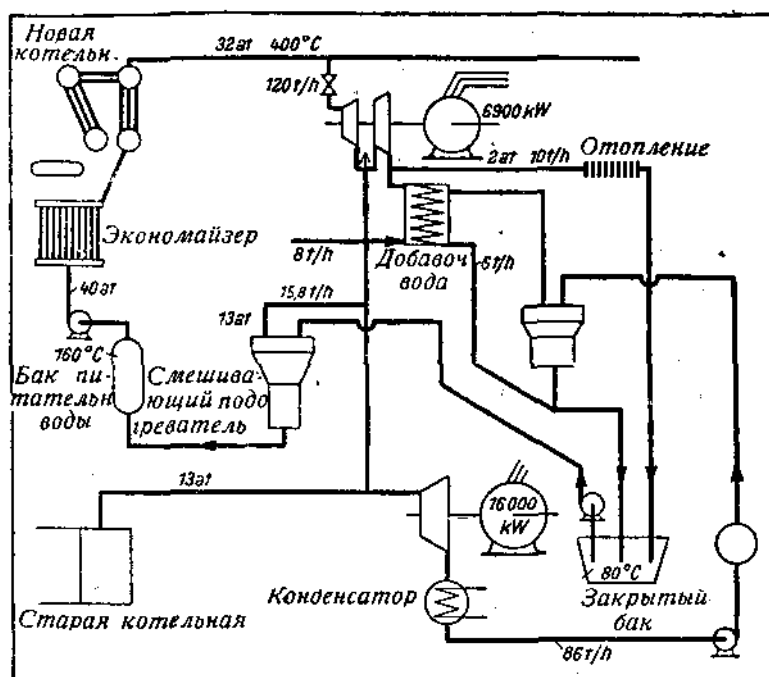
дится к большой части города Кельна кабелями при напряжении после трансформации в 25 000 вольт. 100-киловольтная распределительная и трансформаторная установка связывает эту станцию с установками Рейнско-Вестфальского Об-ва электрических станций.

Для конденсации пара турбин в поверхностных конденсаторах применяется охлаждающая вода со средней температурой в 27°C . Для обратного охлаждения нагревающейся приблизительно до 37°C охлаждающей воды для каждого турбоагрегата предусмотрена градирня, охлаждающая в течение часа с 37° до 27°C 6000 м^3 воды. Градирни представляют собою железные конструкции с деревянной обшивкой.

Пар для турбин вырабатывается в вертикальных водотрубных котлах поверхностью нагрева по 650 м^2 . Каждый котел имеет перегреватель для поднятия температуры пара до 375°C и сконструирован вместе с экономайзером для подогрева питательной воды. В данное время в работе находятся 28 котлов со ступенчатыми полугазовыми толками, дающими возможность сжигать сырой бурый уголь с теплотворной способностью начиная с примерно 1800 ккал/кг. Съем пара с котлов составляет при продолжительной работе 25 и форсировочно 33 кг с м^2 поверхности нагрева в час.

б) Теплоэлектроцентрали.

В последнее время часто строятся комбинированные электротеплофикационные станции, дающие весьма экономичное использование топлива. Такой является построенная с учетом новейших взглядов электрическая станция в Шарлоттенбурге вблизи Берлина. Реконструированная котельная



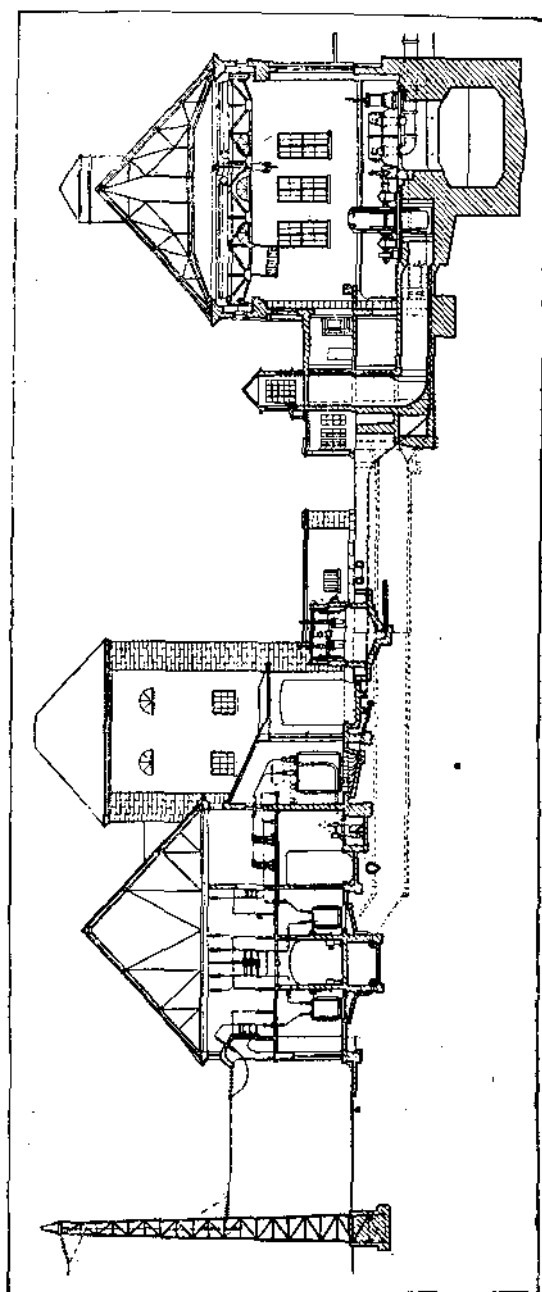
Фиг. 450. Схема паропроводов.

имеет 12 котлов высокого давления поверхностью нагрева по 700 м^2 для 35 ат и снабжена новой установкой для разгрузки угля. Котлы дают пар с перегревом до 400°C , который сперва поступает в турбину 7000 кВт , в которой расширяется с 32 ат до 13 ат , а также в турбину низкого давления в 16000 кВт .

Часть пара направляется в помещение вспомогательных турбин и используется для подогрева питательной воды и для теплофикации района. Схема паропроводов изображена на фиг. 450. При этой схеме в условиях Шарлоттенбургской станции получается расчетное потребление угля на киловатт-час в 0,55—0,60 кг, т.-е. расход тепла около 4000—4200 калорий а киловатт-час. По сравнению с достигавшимися ранее величинами для станций с чисто силовой нагрузкой 0,8—0,9 кг угля на киловатт-час или 5600—6300 калорий на киловатт-час это — существенное достижение.

Генераторы имеют циркуляционное охлаждение. Тепло, полученное охлаждающей водой охладителей генераторов, также идет на подогрев питательной воды. Каждый генератор в 1600 kW работает на два трансформатора по 12500 kVA. Каждый генератор турбин высокого давления работает на один трансформатор той же мощности. Масло трансформаторов охлаждается в воздушных охладителях. Для питания собственных нужд станции распределение энергии, передаваемой в сеть, служит распределительная и трансформаторная установка, находящаяся в особом здании рядом со станцией. Выполнение капитальных работ по фундаментам и водоснабжению произведено строительным объединением фирмы Сименс (Siemens-Bauunion).

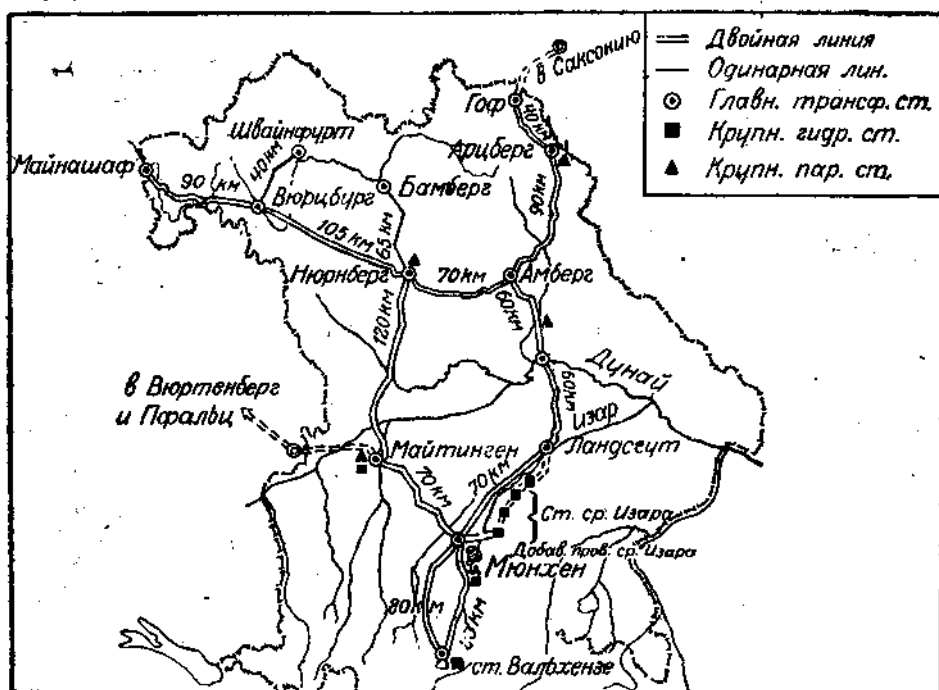
Многие промышленные предприятия, помимо энергии для механических приводов требуют также энергию в виде тепла для целей самого производства и отопления, например, варочные аппараты сахарной промышленности, а также в большом количестве горячую воду, например, красильное и кожевенное производства. В этих случаях рекомендуется сооружение теплоцентрали, при чем достигается использование теплотворной способности топлива приблизительно до 70%, в то время как чисто конденсационные станции в состоянии дать термодинамический коэффициент полезного действия самое большее 25%.



Фиг. 451. Разрез станции.

с) Гидравлические станции.

Станция Walchenseewerk благодаря своему выгодному положению на естественном подножии, озере Kochelsee, предусмотрена в качестве станции для покрытия пиков нагрузки прочих электрических станций Баварского Объединения. Она использует падение воды в 200 м между озерами Walchensee и Kochelsee. Длина напорного туннеля между обоими озерами составляет 1170 м при ширине 4,6 м и высоте 4,8 м. Служащее в качестве резервуара озеро Walchensee дает выравнивание расходов воды между влажными и сухими сезонами. На станции установлены четыре трехфазных генератора мощностью по 20 000 kVA при 500 оборотах в минуту и четыре однофазных генератора по 10 650 kVA при 250 оборо-



Фиг. 452. 100-kV сеть Баварии.

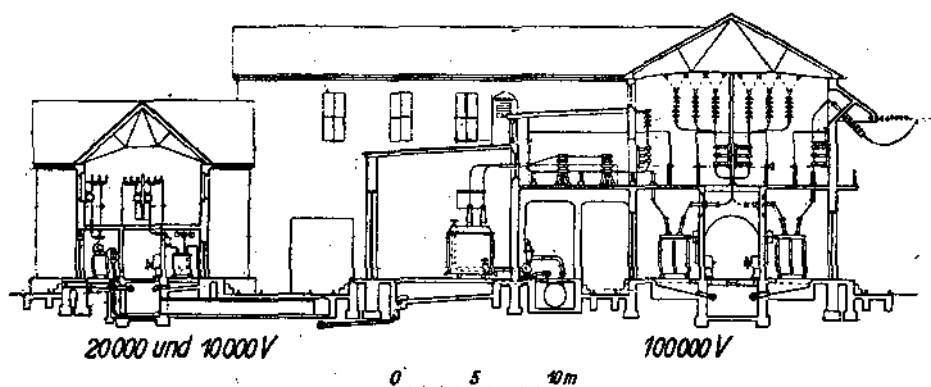
тах в минуту и частоте $16\frac{2}{3}$ пер./сек. Последние могут развивать перегрузочную мощность 16 000 kVA в течение 1 часа и до 20 000 kVA в течение 3 минут. Разрез через части трехфазного и однофазного тока этой станции дан на фиг. 451. В трансформаторной подстанции вырабатываемый машинами ток обоих видов повышает напряжение с 6 до 100 kV. После трансформации трехфазный ток поступает в сеть Баварского Объединения электрических станций, а однофазный — в сеть Государственных железных дорог. Для распределения энергии, производимой электрическими станциями на Вальхенском озере (Walchenseewerk), на Среднем Изаре (Werk Mittlere Isaar) и Кахлетской (Kachletwerk) по территории всей Баварии и для связи этих гидростанций с паровыми районными станциями, служит высоковольтная сеть Баварии (фиг. 452). Снабжение током страны регулируется таким образом, что основная нагрузка приходится на низконапорные гидростанции — Средний Изар и Кахлет, а пики нагрузки, напротив, на высоконапорные и паровые станции.

II. Подстанции.

а) Трансформаторные подстанции.

В отношении распределительных установок трансформаторных подстанций действительны вышеприведенные основные положения о распределительных установках электрических станций.

Трансформаторная подстанция Нюрнберг-Баварской сети изображена на фиг. 453. Установка предназначена на 7 трансформаторов мощностью по 16 000 kVA. Здание распределительного устройства построено по так называемому шахматному типу, при чем каждый масляный выключатель целиком может быть непосредственно вывезен наружу. Уничтожением коридора для доступа к масляным выключателям внутри их помещения достигается сокращение ширины всего здания. Это расположение дает также совершенно светлый коридор для обслуживания масляных выключателей и дает возможность видеть положение разъединителей сборных шин из коридора обслуживания.



Фиг. 453. Разрез подстанции Нюрнберг.

Параллельно со зданием 100 kV расположена распределительная установка 20 kV, к которой примыкает помещение щита управления. Последнее содержит все аппараты и инструменты, необходимые для контроля и обслуживания всей установки, удобно расположенные на распределительных щитах; здесь же находятся распределительные щиты для обслуживания генераторов реактивного тока (Blindleistungsmaschinen).

Машинное помещение для последних служит для установки трех агрегатов по 16 000 kVA. Предварительно установлены две синхронные машины мощностью по 8 000 kVA, присоединенные через трансформаторы к сборным шинам 110 kV.

б) Умформерные подстанции.

Умформерные установки, как правило, употребляются для преобразования трехфазного тока в постоянный. Преобразование может производиться в мотор-генераторах, каскадных умформерах, одноякорных преобразователях или ртутных выпрямителях.

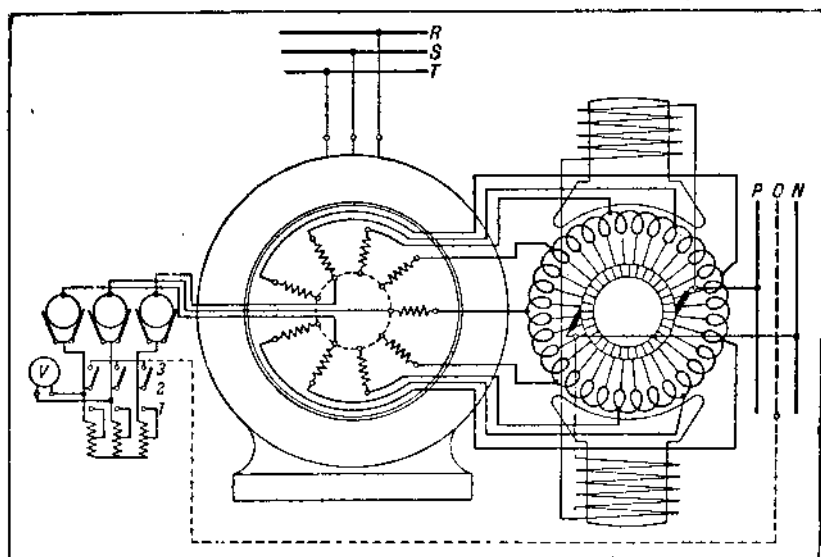
Мотор-генератор применяется с успехом тогда, когда нужно одновременно дать в сеть реактивную мощность и иметь большую надежность в работе.

Применением асинхронного мотора с коллекторным возбудителем трехфазного тока используется также и новое преимущество этой машины, т.е. быстрый и легкий пуск в ход и отпадение синхронизации.

Каскадный умформер состоит из асинхронного трехфазного мотора и непосредственно сцепленной с ним машины постоянного тока, якорь которой электрически соединен с ротором мотора (фиг. 454).

При одинаковом числе полюсов обеих машин мощность, забираемая трехфазным мотором, передается машине постоянного тока на половину в виде механической и на половину в виде электрической мощности, так что агрегат работает одновременно как генератор и как одноякорный преобразователь.

Каскадный умформер легко переносит перегрузку; опасности выпадения из синхронизма не существует, от качаний он защищается сильно демпфирующей обмоткой.



Фиг. 454. Схема включения каскадного умформера.

Изменением возбуждения напряжение на стороне постоянного тока может быть изменяемо на $\pm 10\%$ без применения на стороне постоянного тока дроссельных катушек, трансформаторов рассеяния или вольтодобавочной машины. Особым расчетом обмоток можно достичь того, что трехфазный мотор при определенном напряжении будет работать с коэффициентом мощности, равным единице, или даже получить опережающий ток.

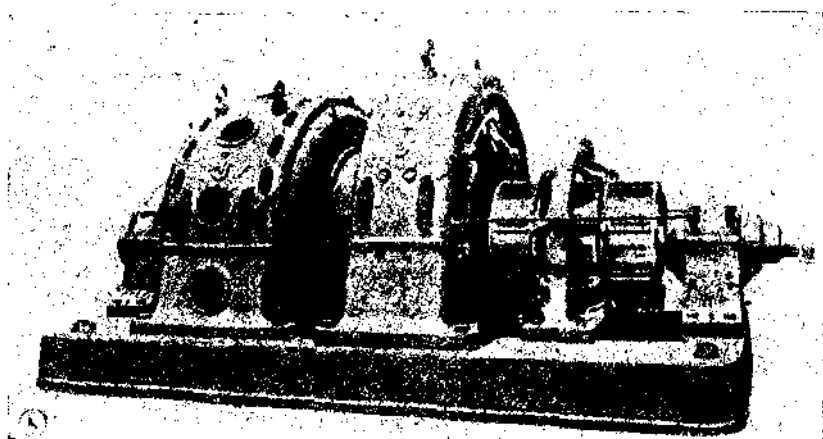
Пуск производится со стороны трехфазного тока с помощью пускового реостата. Когда достигнуто полусинхронное число оборотов, соответствующее в данном случае нормальному числу оборотов, контактные кольца замыкаются накоротко и щетки приподнимаются, после чего умформер работает далее как синхронная машина.

При трехпроводных установках возможно взять нулевой провод от одного из контактных колец стороны трехфазного тока (фиг. 454).

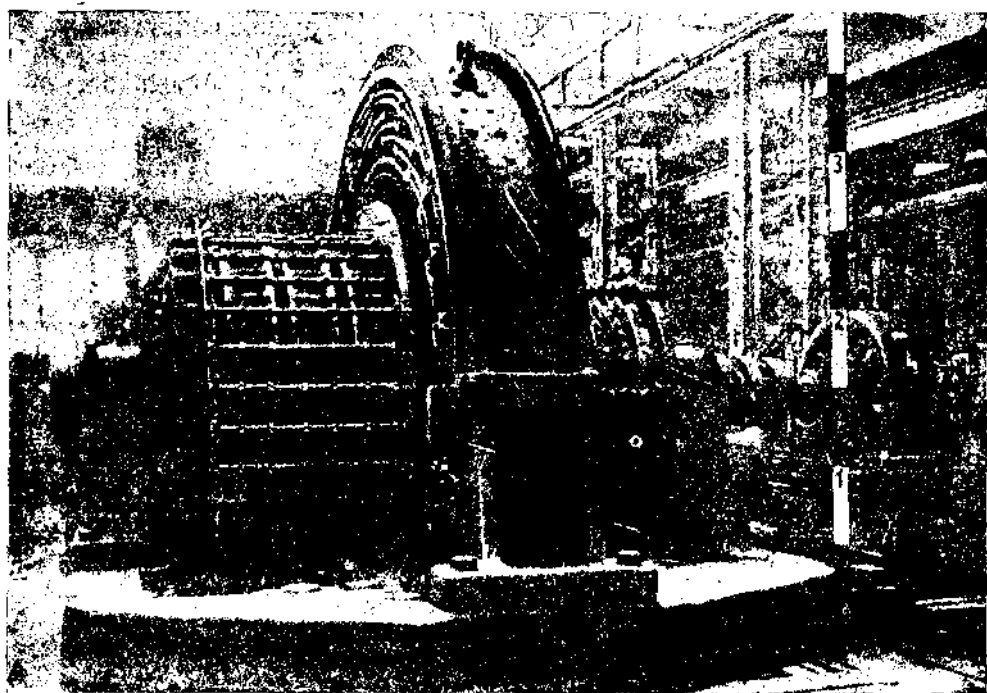
Одноякорный преобразователь трехфазного тока в постоянный имеет всего один якорь, который помимо коллектора для снятия постоянного тока, снабжен еще контактными кольцами для подведения через трансформатор переменного тока; механического привода не имеется.

Эти умформеры работают весьма экономично. В них один вид тока непосредственно преобразуется в другой. Они выполняются трех или шести-

фазными и снабжаются соответственно тремя или шестью контактными кольцами, приключенными к точкам обмотки, сдвинутым друг относительно друга электрически на 120° или же на 60° . Шестифазные преобразователи



Фиг. 455. Каскадный умформер.



Фиг. 456. Одноякорный преобразователь на 5 000 kW

питаются трехфазным током при условии оставления свободными всех шести концов трех фаз трансформатора, соединяющего преобразователь с сетью трехфазного тока, и соединения их с шестью контактными кольцами преобразователя (фиг. 456).

При трехпроводных сетях нулевой провод берется или от нулевой точки трансформатора, или от специальной дроссельной катушки, служащей делителем напряжения.

Благоприятные условия коммутации, создаваемые добавочными полюсами, дают возможность строить одноякорные преобразователи на относительно высокое число оборотов.

Умформеры переносят значительную перегрузку без выпадения из синхронизма и без вредного искрообразования или перекрытий на коллекторе; от качаний они защищаются демпфирующей обмоткой.

Напряжения на сторонах переменного и постоянного токов находятся во вполне определенном отношении, которое может регулироваться изменением возбуждения лишь в весьма незначительной степени и равном соответственно при холостом ходе: около 0,62 при трехфазном токе около 0,72 при однофазном или шестифазном токе (диаметральное напряжение).

При полной нагрузке отношение несколько изменяется вследствие падения напряжения в умформере (на 3—7%).

Регулирование напряжения и нагрузки требует применения специальных средств, из которых наибольшее применение имеют дроссельные катушки и регулировочные трансформаторы.

Регулирование напряжения с помощью дроссельных катушек возможно лишь в ограниченных пределах и имеет тот недостаток, что при нем коэффициент мощности остается практически постоянным лишь при регулировании на повышение напряжения. При понижении напряжения сеть, наоборот, получает индуктивную нагрузку. Однако, для регулирования могут служить вращающиеся трансформаторы, дающие возможность плавной регулировки в широких границах и работу без сдвига фаз при всех нагрузках и напряжениях.

Если высокое напряжение изменяется между значениями, остающимися постоянными в течение долгого времени, первичная обмотка трансформатора снабжается соответствующими ответвлениями, подключение к которым производится в нерабочем состоянии специальным выключателем.

Рекомендуется установить с одноякорным преобразователем рассчитывать на наивыгоднейший $\cos \varphi = 1$.

Пуск в ход одноякорного преобразователя проще всего производится со стороны трехфазного тока, так как при этом нет надобности в синхронизации. Трансформатор в этом случае снабжается ответвлениями, с помощью которых к преобразователю во время пуска подводится неполное напряжение. Токи, образующиеся в демпфирующих обмотках, заставляют преобразователи пойти как асинхронный мотор. После того, как преобразователь достиг синхронного числа оборотов и установилась правильная полярность, на него с помощью переключателя дается полное напряжение.

Если имеется в распоряжении постоянный ток (например, в установке с аккумуляторной батареей или при работе преобразователя с другими преобразователями на сеть постоянного тока), пуск в ход одноякорного преобразователя может быть произведен также со стороны постоянного тока, как обычно пускаются моторы постоянного тока.

При пуске преобразователя со стороны трехфазного тока с помощью пускового мотора целесообразно иметь непосредственно сцепленный с преобразователем асинхронный мотор, выполненный с меньшим числом полюсов по сравнению с одноякорным преобразователем, с возможностью регулировки на синхронную скорость включением сопротивлений в цепь ротора. По включении преобразователя пусковой мотор выключается и отсоединяется от преобразователя.

Коэффициент полезного действия одноякорного преобразователя лучше, чем всякого другого; коэффициент полезного действия каскадного умформера примерно на 1%, ниже, в то время как мотор-генератор значительно менее экономичен.

Часто, в особенности при малых мощностях, целесообразнее выбирать вместо одноякорного преобразователя мотор-генератор с синхронным мотором. Он дает исключительно наглядную, легко обслуживаемую установку и независимость от числа оборотов и от сдвига фаз.

Переменный ток может преобразовываться в постоянный помимо машин, так же и в так называемых ртутных выпрямителях (Quecksilberdampfgleichrichter). В этих аппаратах для преобразования используется вентильное действие ртутной вольтовой дуги в вакууме.

Сильно эвакуированный сосуд снабжается анодами, в количестве, соответствующем числу фаз, соединяющимися с концами вторичной обмотки трансформатора. Между ртутным катодом и нулевой точкой трансформатора включаются потребители постоянного тока. После того, как дуга зажглась, пульсирующий постоянный ток течет от катода к нулевой точке трансформатора.

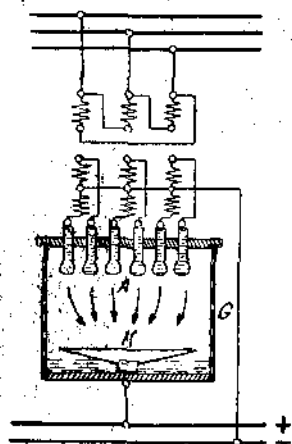
Холостой ход осуществляется с помощью вспомогательного возбуждательного контура.

Выпрямители для силы тока от 6 до 300 ампер выполняются со стеклянным кожухом (стеклянный тип). При силе тока свыше 300 ампер применяются большой выпрямитель мощности — Grossquecksilberdampfgleichrichter — металлический тип. Заводы Сименс-Шуккерт для 15—60 периодов поставляют следующие выпрямители:

Выпрямители трехфазного тока.

Модель	Сила длительного постоянного тока I_{g1} ампер	Применимы для постоянного напряжения P_g		Мощ- ность L_g kW	Падение напря- жения в сосуде V	Коэффициент полезного действия выпрямителя %	Вес кг
		миним. V	максим. V				
Стеклянные	VD 6	6	40	250	15	Для всех сил тока $\eta'_{g1} = \frac{P_g}{P_g + \text{падение напряж.}}$	0,7
	VD 10	10	40	250	15		0,7
	VD 25	25	40	600	20		1,8
	VD 40	40	80	600	20		1,8
	VD 60	60	80	600	20		2,5
	VD 100	100	100	600	20		2,5
	VD 200	200	100	600	10		5,0
Металлические	VD 600	600	110	600	25		1 600
	VD 1 000	1 000	110	600	25		2 400
	VD 1 750	1 750	110	600	25		3 000

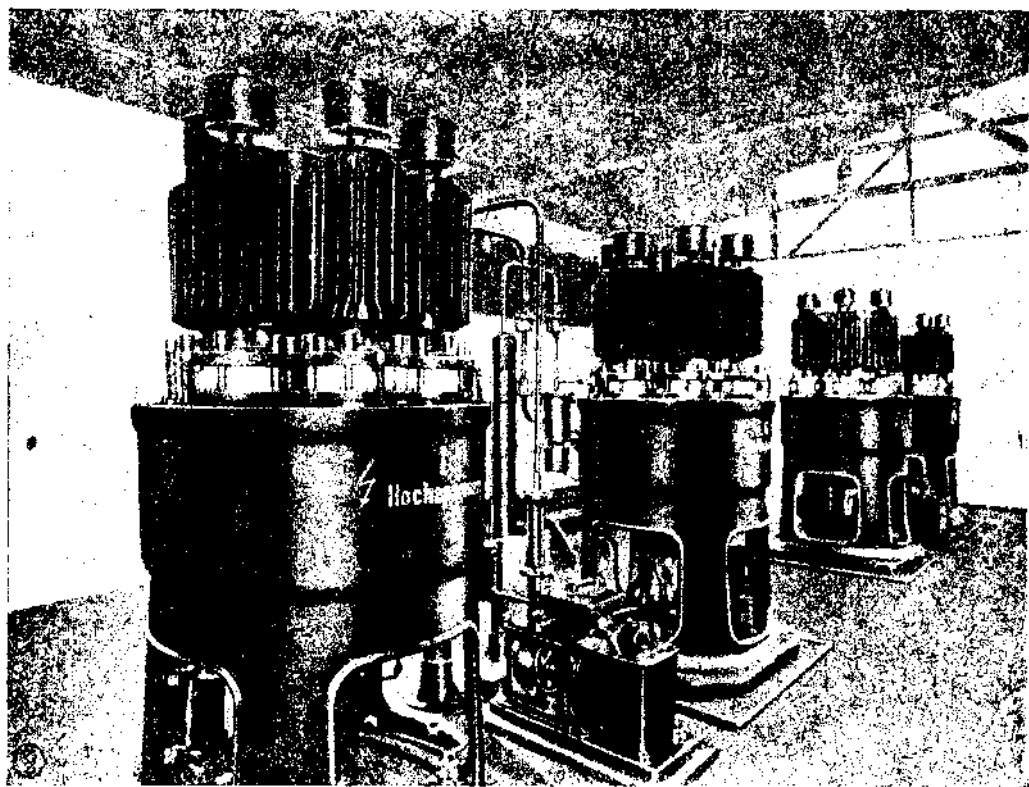
Падение напряжения в выпрямителях не зависит от величины рабочего напряжения и почти не зависит от силы тока, но составляет, смотря по выполнению выпрямителя, от 10 до 25 вольт. Из этого следует, что



Фиг. 457. Схема включения ртутного выпрямителя.

коэффициент полезного действия собственно ртутного выпрямителя одинаков при любых нагрузках и что коэффициент полезного действия может быть легко вычислен по падению напряжения. Так, ртутный выпрямитель для 500 вольт может развить коэффициент полезного действия $500/515=97,2\%$, а для 60 вольт $60/75=80\%$.

Естественно, следует также принимать в расчет коэффициенты полезного действия трансформаторов. Благодаря кратковременной нагрузке, они ниже (более чем на $1\frac{1}{2}\%$), чем таковые же при обычном режиме (фиг. 458).



Фиг. 458. Большой металлический ртутный выпрямитель.

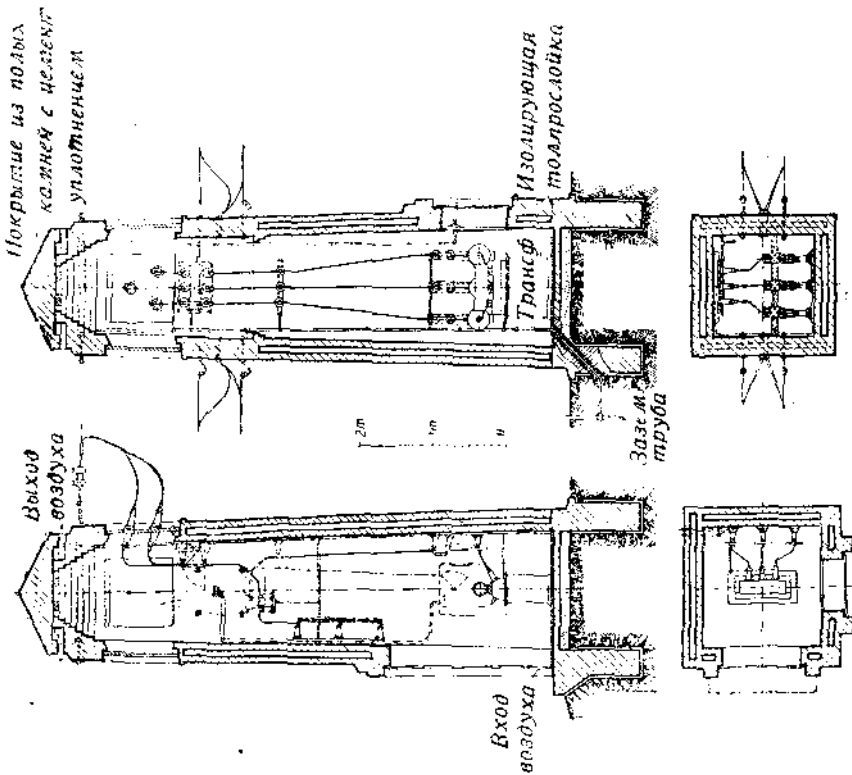
Кроме того, надо учитывать при подсчете общего коэффициента полезного действия еще потребление энергии воздушными насосами (300 ватт) и так называемой основной нагрузкой зажигательной системы, которое достигает приблизительно от 120 ватт у самых маленьких стеклянных выпрямителей (6 ампер) до 700 ватт у металлических выпрямителей. Потреблением энергии тока для зажигания дуги можно пренебречь, так как ток этот включается лишь на несколько мгновений для пуска в ход выпрямителя.

Коэффициент мощности выпрямителя составляет около 0,85—0,95, смотря по нагрузке.

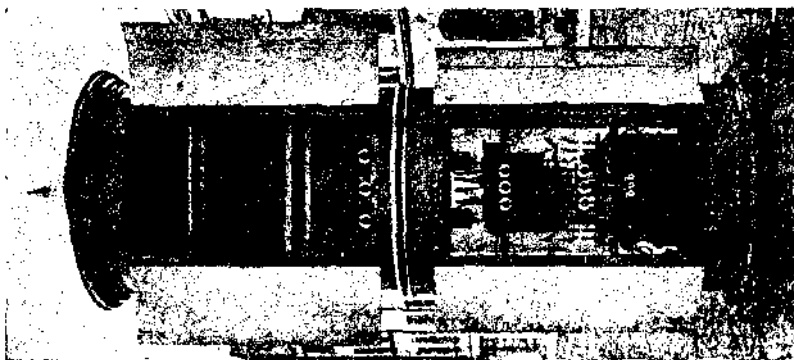
Кроме высокого коэффициента полезного действия, следует упомянуть в качестве преимущества ртутных выпрямителей: малое занимаемое помещение, малый вес, бесшумность, потребность в небольшом обслуживании, очень малый износ, нечувствительность к толчкам нагрузки, независимость от частоты тока, отсутствие фундаментов.

с) Трансформаторные подстанции в будках.

Наибольшее количество всех трансформаторов находится в распределительных пунктах городов и селений в так называемых трансформаторных будках башенного типа, постоянный надзор за которыми невозможен из экономических соображений. Вследствие этого к подобного рода подстан-



Фиг. 480. Подстанция с одним трансформатором.



Фиг. 459. Трансформаторный киоск, используемый для рекламных целей.

циям применяются весьма жесткие требования в отношении надежности в работе всех частей. В то же время исключительное значение приобретает низкая стоимость установки.

В городских установках с кабельными сетями применяются подстанции в маленьких, используемых в качестве столбов для рекламы, киосках; (фиг. 459).

Для сетей районных станций находят применение только выполненные из кирпича подстанции. Архитектурное оформление будок, особенно в сельско-хозяйственных округах, должно иметь соответствующий вид, как это представлено, например, на фиг. 460 и 461.

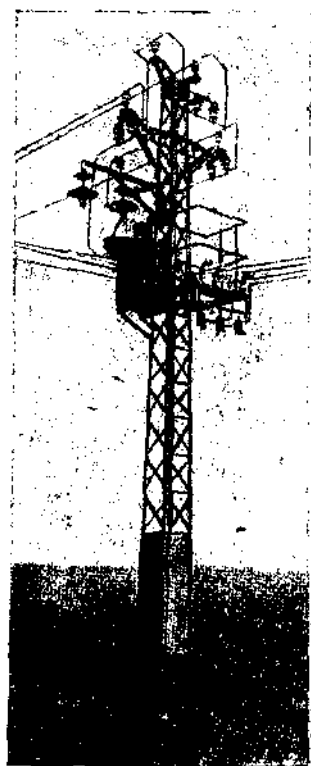
Внутри будки, в нижней части ее, располагается трансформатор с относящейся к нему распределительной, измерительной и предохранительной аппаратурой (фиг. 458). Трехполюсный разъединитель обслуживается с помощью штангового привода с распределительного щита низкого напряжения, что дает возможность снять напряжение с подстанции еще перед входом в нее.

д) Мачтовые трансформаторные подстанции.

При небольшом количестве абонентов с малым потреблением энергии сооружение подстанции в специальном здании более уже не окупается; в таких случаях решением является установка трансформаторов на мачтах — так называемые мачтовые подстанции.



Фиг. 461. Трансформаторная подстанция.



Фиг. 462. Мачтовая трансформаторная подстанция.

Фиг. 462 показывает общий вид подобной подстанции. Она состоит в основном из решетчатой* мачты с квадратным сечением, укрепленной в земле на асфальтированном основании. Форма и жесткость опоры таковы, что мачта имеет такую же устойчивость, как и при применении тяжелых и дорогих бетонных оснований.

На высоте около 5 м над уровнем земли мачта несет на одной стороне помост из углового железа с деревянным настилом, а на другой стороне на той же высоте — железную консоль для поддержки трансформатора, который может быть поднят при помощи прочной верхней траверсы и полиспаста.

Расположение проводов в основном выбирается из тех соображений, чтобы расстояние между отдельными проводами высокого напряжения, равно как и между проводами высокого напряжения и проводами низкого напряжения и землей, было бы достаточно для того, чтобы не было пере-

крытия их птицами или ветвями деревьев. Провода высокого напряжения закрепляются на защищенных от птиц траверсах на вершинах мачты и по обеим сторонам ее корпуса; они идут сперва к предохранителям высокого напряжения, от них к трем защитным дроссельным катушкам и далее к клеммам трансформатора на стороне, обращенной к помосту.

Линии низкого напряжения, которые идут от станции во все стороны, ответвляются от так называемых узловых предохранительных пунктов. Если на стороне низкого напряжения ставятся выключатели или также счетчики, то провода стороны низкого напряжения подводятся в двух вертикальных трубках к шкафу из листового железа высотой около 2 м, расположенному от основания мачты. В этом шкафу могут так же быть расположены главные и распределительные предохранители низкого напряжения, так что тогда все манипуляции могут быть произведены с земли. Шкаф этот представляет собой одновременно место для хранения клещей для предохранителей высокого напряжения и запасных частей; дверь осуществляет также разъединение проводов при влезании на мачту.

Е. Линии передач и сети.

1. Линии передач.

Чаще всего встречается два типа выполнения воздушных линий высокого напряжения.

а) Линии высокого напряжения на деревянных мачтах с пролетами приблизительно до 80 м и напряжениях приблизительно до 35 kV.

б) Линии высокого напряжения на железных и железобетонных мачтах со значительными пролетами.

Первые служат, главным образом, для распределения энергии между отдельными пунктами, в то время как последние употребляются в качестве питательных линий для передачи больших мощностей на далекие расстояния.

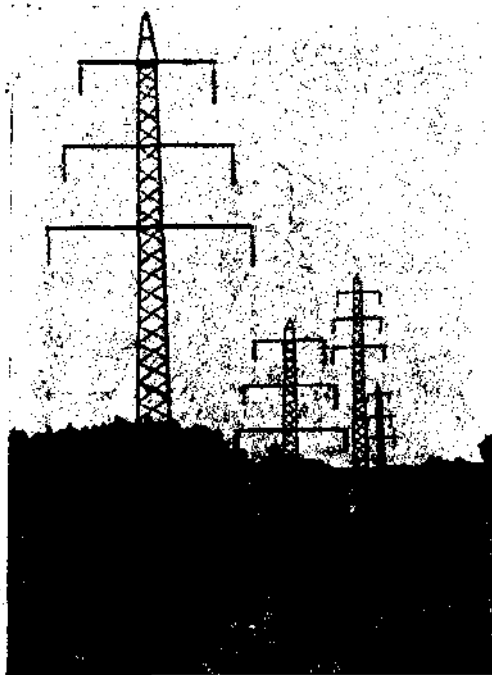
Выбор целесообразного пролета имеет очень большое значение для удачного проекта воздушной линии.

В зависимости от степени надежности выполнения передачи различают:

- линии нормальной надежности,
- „ повышенной надежности,
- „ с защитой на случай обрыва.

Линии нормальной надежности находят применение в тех случаях, когда участок передачи проходит в стороне от проезжих дорог, от других передач и промышленных предприятий и населенных местностей (фиг. 463).

Повышенная надежность требуется тогда, когда линия пересекает дороги с интенсивным движением, населенные районы и промышленные



Фиг. 463. Воздушная линия 100 kV.

установки, или же проходит настолько близко от них, что упавшие провода представляли бы опасность для людей.

Выполнение линий с защитой на случай обрыва имеет место при пересечении с железнодорожными и почтовыми дорогами, телеграфными линиями, равно как с каналами и судоходными реками. Для всех видов выполнения имеются специальные наставления в правилах для воздушных линий сильного тока, изданных Союзом германских электротехников.

а) Материал для воздушных линий.

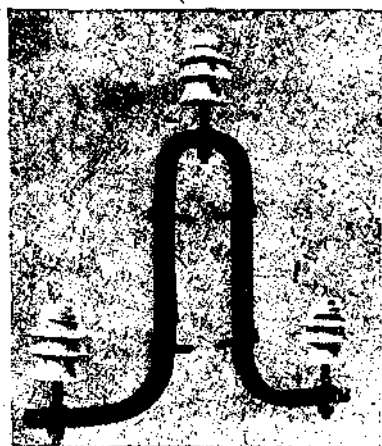
В качестве материала для воздушных линий применяются медь, алюминий и сталь-алюминий.

Для линий особенно высокого напряжения алюминий в качестве материала для проводов приобретает повышенное значение.



Фиг. 464. Соединение для воздушных линий.

Очень важным условием надежности установки является применение соответствующих соединительных деталей, несущих и оттяжных клемм, которые должны удовлетворять всем требованиям в электрическом и механическом отношении. Кроме разнообразных клеммовых и заклепочных соединителей, хорошую пригодность показали введенные заводами Сименс-Шуккерт соеди-



Фиг. 465. Лировидная поддержка с опорными изоляторами.



Фиг. 466. Изолятор высокого напряжения для воздушных линий.

нения зарубками вследствие их низкого электрического сопротивления и высокой механической прочности. Так же и для соединения стале-алюминиевых проводов этот тип соединителя вполне подходящ. Кроме того, этот же тип соединителя с выгодой может быть применен для оттяжки медных, алюминиевых и стале-алюминиевых тросов, как это показано на фиг. 464.

б) Изоляторы.

Одной из важнейших проблем в области воздушных передач всегда являлось изолирование точек подвески и оттяжки. Опорные изоляторы для высокого напряжения уже нормированы Союзом германских электро-

техников (фиг. 465). Для более высоких напряжений применяются известные подвесные изоляторы, при чем здесь предпочтительнее оказываются так называемые бесцементные шапочные изоляторы (kittlosen Kappenisolatoren).

По сравнению с нормальными шапочными изоляторами введенный Фаупелем (Vaupel) „изолятор“ (фиг. 466) представляет значительные преимущества. В следующей сводной таблице даны средние величины, полученные из большого количества исследований для средней прочности на разрыв, главных размеров и рабочего напряжения для одного звена.

Т и п	Фабричный номер	Строительная длина	Диаметр тарелки	Средняя прочность на разрыв кг	Среднее рабочее напряжение на одно звено kW
		мм			
V Большой . .	На 401	100—130	170	3 000—3 500	5—10
	На 313	170	280	6 000—7 000	15—20
V Малый . .	На 314	185	280	9 500—10 600	15—20
V Исполн. . .	На 357a	230	350	18 000—24 000	20—25

с) Мачты для воздушных линий.

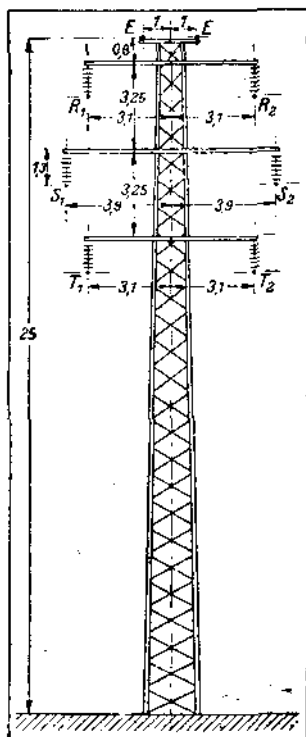
Мачты применяются деревянные, железные и бетонные. Особенно характерным для новых воздушных линий высокого напряжения является применение значительных пролетов. Этим не только достигается большая экономия, но, кроме того, вследствие уменьшения числа опорных точек проводов, снижается число мест возможной утечки тока и тем повышается надежность работы всей установки.

Помимо железных решетчатых мачт (фиг. 467), хорошо оправдались на практике железобетонные мачты, изготавливаемые пневматическим способом (фиг. 468). Для достижения необходимой устойчивости несущие мачты на участках линии снабжаются плоскими опорными конструкциями, состоящими из защищенных от гниения деревянных шпал, железных балок или бетонных плит. Более нагруженные угловые, оттяжные и концевые мачты выполняются с массивными бетонными фундаментами. При очень плохом в строительном отношении грунте, каким является болотистая (торфяная) почва или плавучие пески с большим содержанием воды, фундаменты посредством решетки из деревянных или бетонных свай доводятся до надежного грунта.

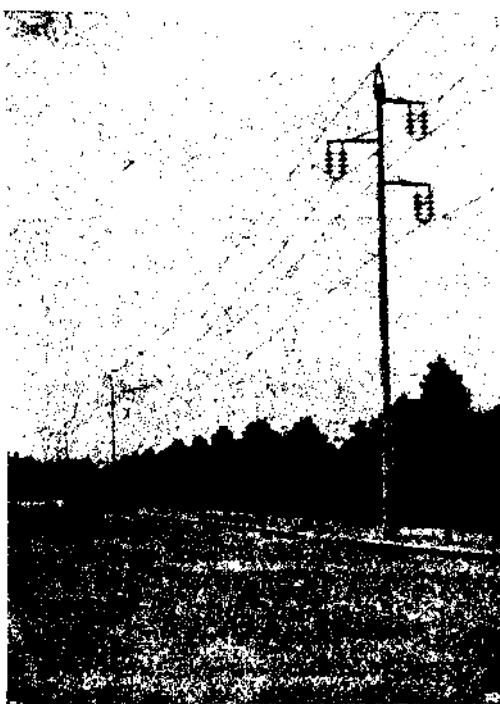
д) Пересечения [с почтовыми дорогами,]железнодорожными линиями и реками.

Пересечения с важными государственными почтовыми и телеграфными линиями, железными дорогами и водными путями сообщения снабжаются безопасной от обрыва подвеской на двух опорных изоляторах или на двойных оттяжных или же несущих гирляндах подвесных изоляторов (фиг. 469). Длины пролетов в новых установках на пересечениях достигают многих сотен метров. Вид выполненного фирмой Сименс-Шукерт перехода через большую реку с важнейшими данными изображен на фиг. 470.

Пересечение с Рейном близ Андернаха при длине пролета 739 м линией 20 kV показано на фиг. 471; пересечение с Рейном у Альтрипжерфэре имеет длину пролета 290 м при напряжении в 100 kV. Пересечение почтовой дороги передачей 100 kV Фридрихсфельде—Моабит (Берлин) изображено на фиг. 472 и в заключение на фиг. 473 дано еще пересечение железной дорогой 100-kV линии в Рейнпфальце.



Фиг. 467. Железная решетчатая мачта для 100 kV; размеры показаны в метрах.



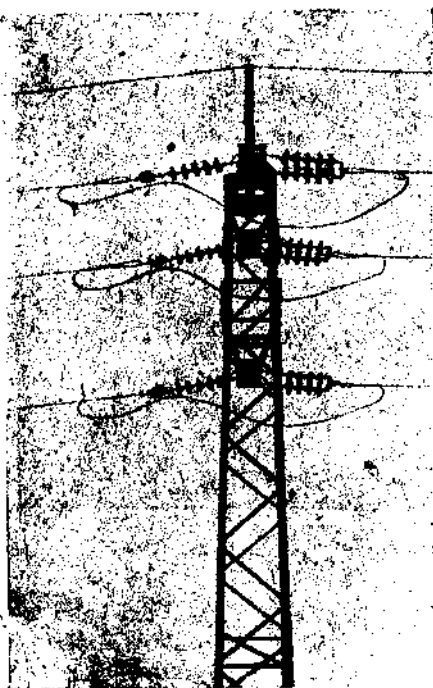
Фиг. 468. Железобетонная мачта.

е) Кабели.

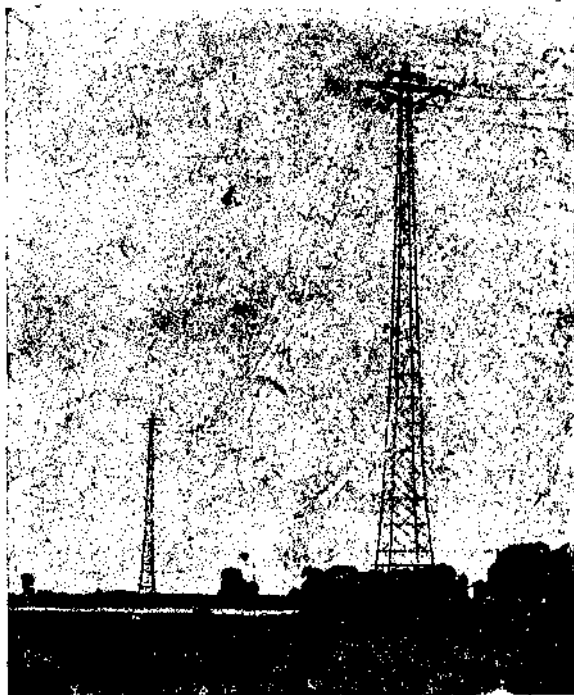
Кабели высокого напряжения находят широкое применение для соединения генераторных станций и подстанций. Кроме того, они приобретают все большее и большее значение для районных станций и передачи энергии на большое расстояние. Трехфазные кабели нормальной конструкции могут выполняться вполне надежно лишь для относительно низких напряжений около 35 000 вольт (фиг. 474). При более высоких напряжениях вследствие тангенциальных напряженностей поля в изолирующем материале на поверхности гильз для отдельных жил и общей гильзы появляются явления пригорания, при применении очень высоких напряжений уже через очень короткое время делающиеся заметными благодаря нагреванию и запаху.

Монтаж соединительных частей многожильных кабелей уже при 30 000—35 000 вольт требует совершенно исключительной тщательности; в особенности это относится к монтажу жил в соединительные и концевые муфты, так как здесь возникает опасность легкого возникновения коронирования вследствие искажения поля.

Поэтому для напряжения свыше 60 000 вольт, которое является предельным значением, отказываются от применения многожильных кабелей и применяют чаще всего три небронированных однофазных кабеля, которые могут совершенно надежно выполняться для линейных напряжений до 120 000 вольт. Основание для предпочтительности выбора однофазных кабелей по сравнению с обычными трехжильными трехфазными кабелями



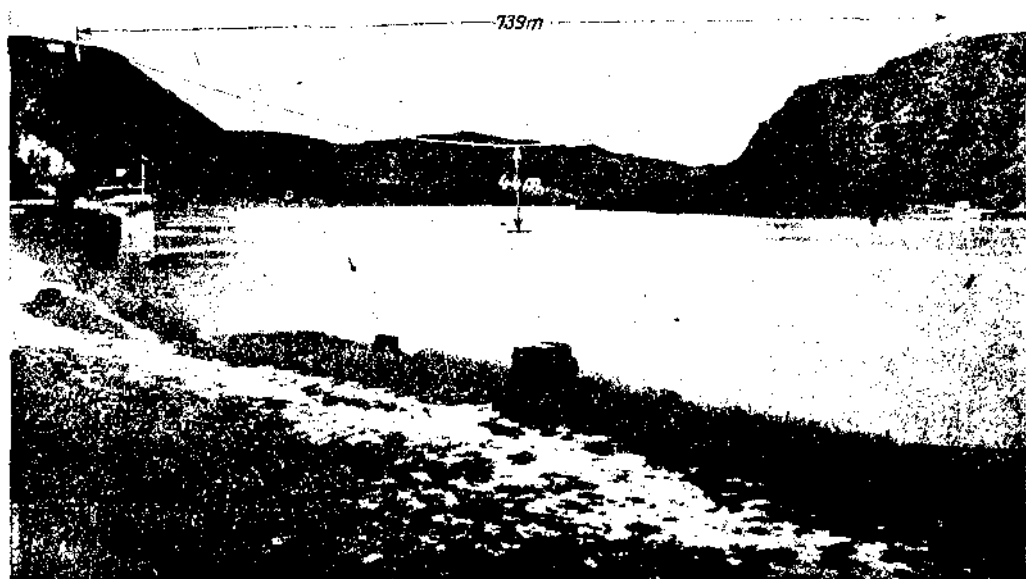
Фиг. 469. Верхушка мачты с одинарными и двойными оттяжными гирляндами.



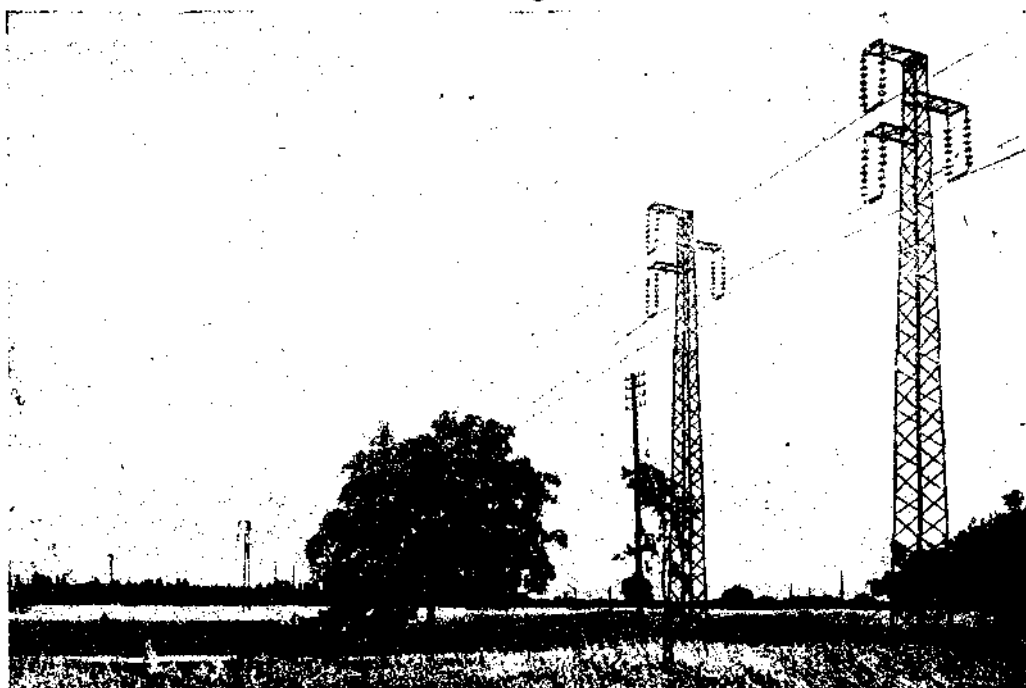
Фиг. 470. Пересечение р. Гавель линии 60 kV (6 бронзовых проводов $\times 50 \text{ мм}^2 + 4$ телефонных провода $\times 35 \text{ мм}^2$. Длина пролета — 267 м, проезжая высота — 32 м, максимальный провес — 14 м, высота башен — 55 м.)

следует искать в том, что в первых сама конструкция требует выполнения изолирующих слоев из совершенно однородного материала, и что вместо образующегося в нормальных трехфазных кабелях вращающегося электрического поля здесь возникают три отдельных переменных поля, что не дает никаких поводов к появлению тангенциальных напряжений в диэлектрике. Также и гарнитуру при однофазных кабелях гораздо легче выполнить более надежной для работы, чем при многофазных кабелях. Однофазные кабели для работы на переменном токе не должны снабжаться железной броней во избежание нагревания вихревыми токами. Поэтому, при прокладке они нуждаются в защите от механических повреждений целесообразным прикрытием. Три однофазных кабеля, естественно, получаются дороже, чем один трехфазный кабель для того же напряжения.

В новых кабелях Хэштедтера (Höchtaedter) (фиг. 475) осуществлена конструкция, найденная в результате долголетних исследований, соединяющая преимущества одножильного и многожильного кабелей. Этот кабель состоит из трех однофазных кабелей, но каждая из трех отдельных жил



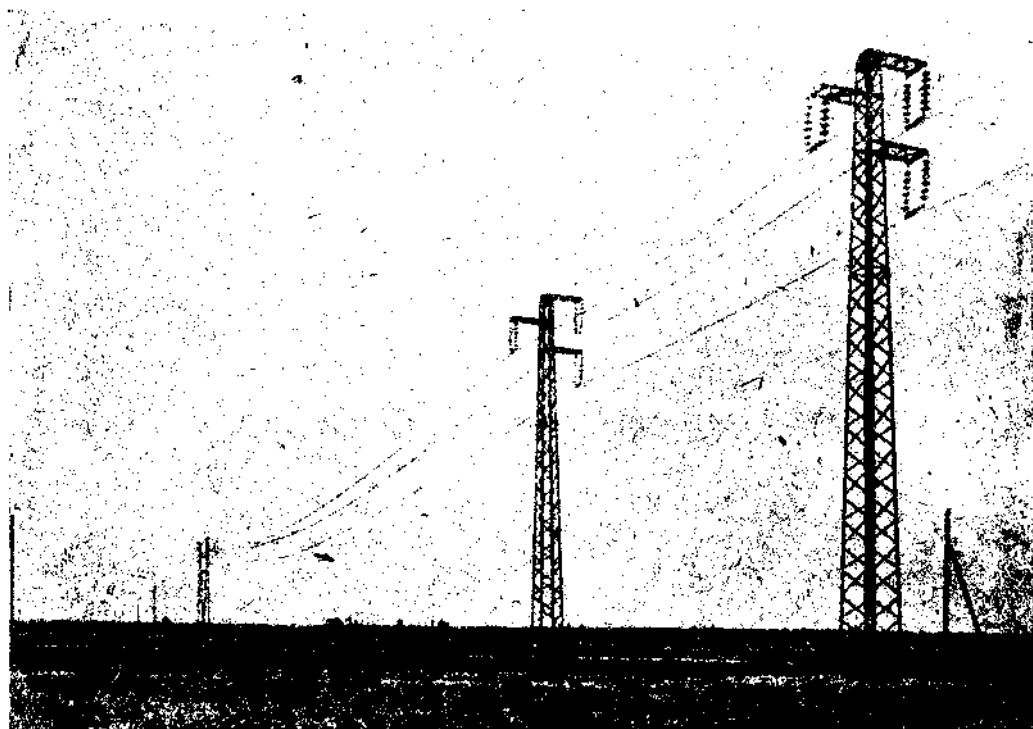
Фиг. 471. Пересечение линии 200 kV с Рейном у Андернаха.



Фиг. 472. Пересечение линии 100 kV с шоссе и почтовой линией.

снабжается не свинцовой оболочкой, как у однофазного, а оболочкой из специальной металлизированной бумаги, плотно, без воздушных промежутков, облегающей изолирующий слой жилы, являясь, таким образом, как бы диэлектрически спаянной с последним. При этом явления „излучения“ исключаются, что, наоборот, происходит при высоком напряжении в кабелях со свинцовой оболочкой.

При таких кабелях жилы скручиваются и на них напрессовывается одна общая свинцовая оболочка, а затем такой кабель бронируется как обычно. Металлизированные слои трех отдельных жил находятся в электри-

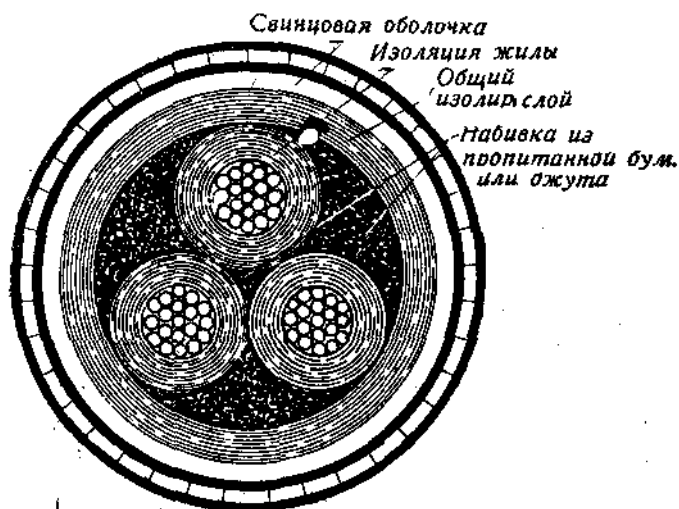


Фиг. 473. Пересечение линии 100 kV с железной дорогой.

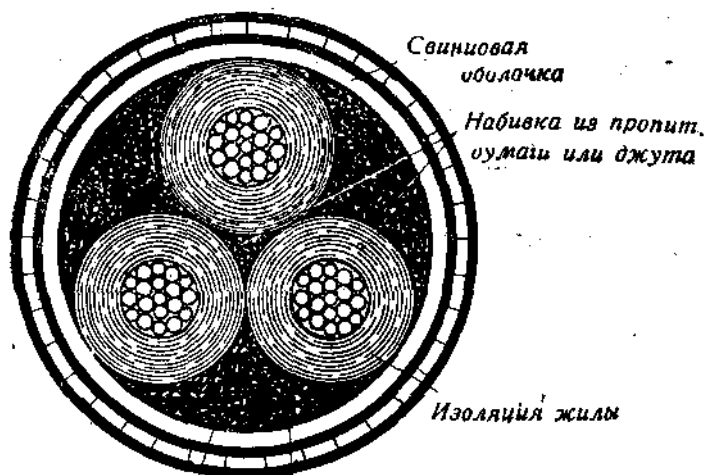
ческом соединении со свинцовой оболочкой и, таким образом, имеют потенциал, равный нулю, так что материал, заполняющий промежутки между отдельными жилами, совершенно не подвержен действию поля и не испытывает никаких напряжений. В кабеле возникают три простых переменных поля, подвергающих диэлектрик лишь радиальным напряжениям.

Потери при холостом ходе подобного кабеля существенно меньше, чем в простом однофазном кабеле и особенно по сравнению с обычным трехфазным кабелем, так как эффект излучения между изоляцией жил и металлами усиливается в трехфазном кабеле потерями в добавочной изоляции. Хэштердовские кабели (H-Kabel) могут надежно выполняться, по крайней мере для тех же напряжений, что и однофазные кабели, т.-е. до 60 000 вольт, они могут снабжаться броней как обычные трехфазные кабели и тем самым получают лучшую защиту от механических повреждений, чем небронированные однофазные кабели.

Нормальные трехфазные кабели для 35 000 вольт при работе в сетях с часто возникающими перенапряжениями могут терять надежность в работе от явлений подгорания изолирующего материала между жилами; в кабелях Хэшштедтера этого не происходит; также и продолжительность работы кабеля Хэшштедтера для рабочего напряжения 35 000 вольт должна быть больше, чем обычного трехфазного кабеля.



Фиг. 474. Поперечный разрез нормального кабеля.



Общий изолирующий слой

Фиг. 475. Поперечный разрез кабеля Хэшштедтера.

Соединительные муфты при кабелях Хэшштедтера могут быть выполнены так же, как в обычных трехжильных кабелях для высоких напряжений. Эти кабели имеют еще одно преимущество по сравнению с нормальными трехфазными кабелями, которые не следует недооценивать—именно в отношении нагрузки током. Конструкция кабелей Хэшштедтера сама по себе уже обуславливает то, что выделяющие тепло провода лежат ближе к свинцовой оболочке, чем в обычных трехфазных кабелях. Это обеспечивает также более выгодные условия охлаждения, которое еще улучшается вследствие металлизации жил, что увеличивает переход тепла изнутри кабеля через свинцовую оболочку. Сравнительные исследования над обычными кабелями и соответствующими кабелями Хэшштедтера показали, что последние при том же повышении температуры могут нагружаться током, примерно, на 15% больше, чем нормальные кабели.

II. Распределительные сети и тарифы.

От подстанций ток распределяется по отдельным потребителям. Распределительные сети выполняются в городах в виде подземных кабельных сетей, а в менее значительных населенных пунктах—над поверхностью земли в виде воздушных линий. Через так называемые домовые вводы ток подводится к отдельным потребителям, у которых потребление энергии измеряется электрическими счетчиками.

Мы не можем здесь описывать различные типы счетчиков; отметим лишь, что счетчики разделяются следующим образом:

а) по роду тока: счетчики постоянного и переменного — однофазного и трехфазного токов;

б) по роду измерения: счетчики ваттчасов и амперчасов, далее на включаемые непосредственно или через посредство трансформаторов тока и напряжения;

с) по тарифу, для которого они применяются.

Наиболее распространенные тарифы:

1) Тариф с договорной годовой оплатой. Электрическая энергия начисляется по некоторому договорному значению, часто применяется ограничитель тока, выключающий установку при переходе тока через допустимую границу.

2) Нормальный тариф киловатт-часов. При этом тарифе устанавливается цена единицы энергии для освещения и силы. Расчет с абонентами производится по счетчикам.

3) Двойной тариф. Электрическая энергия расценивается различно в разное время дня и ночи. Счетчик имеет два суммирующих механизма, которые в определенное время часовым механизмом попеременно приключаются к оси счетчика. Часто вводится еще градация тарифа за киловатт-час или скидка, зависящая от времени использования, т.-е. отношения

$$\frac{\text{потребление энергии в kWh}}{\text{приключенная мощность в kW}}$$

4) Максимальный тариф. Цена киловатт-часа зависит от максимальной величины потребления энергии за известное время. Силовые станции, подстанции и крупные абоненты часто снабжаются регистрирующими счетчиками максимального потребления, которые отмечают изменение нагрузки по времени.

5) Пиковый тариф. Потребление мощности до определенной величины отмечается по некоторому договорному значению по тарифу киловатт-часов. Потребление, превосходящее эту границу, оплачивается соответственно по тарифу киловатт-часов или же по повышенному тарифу.

6) Тариф по таксе. Для данной установки устанавливается определенная оплата. Потребление в киловатт-часах измеряется нормальным счетчиком и расценивается по возможно низкой ставке за киловатт-час. Фиксированная основная плата определяется по приключенной мощности в киловаттах, по максимуму нагрузки в киловаттах, по числу комнат, по объему помещения в кубических метрах или по арендной плате; при приключениях в сельских местностях — по размеру обрабатываемого участка в гектарах.

7) Тариф по реактивной энергии. В то время, как вышеуказанные тарифы основаны на оплате полезной работы, в последнее время вошли в употребление также счетчики, определяющие величину реактивной энергии для компенсации потерь дающей ток станции.

В последнее время находят также применение ночной тариф и тариф для нагревательных целей. Первый из них предназначен для отдачи дешевого тока в ночное время для потребителей, аккумулирующих тепло (отопительные котлы, печи и т. д.) при выключении прочих нагрузок, в то время как второй предусматривает отдачу дешевого тока для нагревательных и кухонных установок с учетом особыми счетчиками.

ОГЛАВЛЕНИЕ.

	Стр.
Предисловие	3
Предисловие к русскому изданию.	4
1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ.	
Часть 1. Машины постоянного тока, синхронные машины переменного тока.	
Составил Гуго Штэссингер.	
Введение	5
Исторический обзор	6
А. Машина постоянного тока	13
1. Физические основы	—
2. Индуцированная ЭДС	17
3. Момент вращения	26
4. Устройство машины постоянного тока	29
5. Магнитная цепь	30
6. Реакция якоря	41
7. Обмотки якоря	47
8. Коммутация тока	56
9. Потери, коэффициент полезного действия, нагревание	65
10. Схемы, характеристики и свойства при эксплуатации	76
I. Машина с посторонним возбуждением	79
II. Машина последовательного возбуждения	84
III. Машина шунтового возбуждения	89
IV. Машина со смешанным возбуждением	93
V. Особые источники постоянного тока	94
11. Части конструкции	98
12. Расчет машины постоянного тока	108
В. Синхронная машина переменного тока.	142
1. Переменный ток	—
2. Индуцированная ЭДС	148
3. Устройство синхронной машины	164
4. Поле якоря	166
5. Векторная диаграмма и рабочий процесс синхронной машины	176
6. Параллельная работа синхронных машин	196
7. Части конструкций	204
8. Расчет синхронной машины переменного тока	221
Часть 2. Трансформаторы и асинхронные машины. Составил Герхард Реерник	
Исторический обзор	243
А. Трансформаторы	250
1. Общие сведения и конструкция	—
2. Магнитный поток	252
3. Ток холостого хода	254
4. Векторная диаграмма трансформатора	255
5. Распределение мощности в трансформаторе	259
6. Холостой ход и короткое замыкание	260
7. Падение напряжения в трансформаторе	262
8. Трехфазный трансформатор	263
9. Особые конструкции	264
10. Конструкции	265
11. Данные для расчета трансформатора	266

	Стр.
В. Асинхронная машина	270
1. Область применения и общее устройство	—
2. Вращающийся поток	275
3. Ток холостого хода	278
4. ЭДС. Скольжение	279
5. Рассеяние. Векторная диаграмма	281
6. Распределение мощности	282
7. Круговая диаграмма	283
8. Испытание трехфазного асинхронного двигателя	288
9. Момент вращения и устойчивость двигателя. Влияние величин U_1 , ω и f_1 на круговую диаграмму	291
10. Регулирование числа оборотов асинхронного двигателя	293
11. Асинхронная машина с коротко-замкнутым ротором	295
12. Вращающийся трансформатор, преобразователь числа периодов и каскадный умформер	296
13. Компенсированные асинхронные машины	299
14. Однофазный асинхронный двигатель	305
15. Пояснение к снимкам и выбор размеров	306
Часть 3. Коллекторные машины. Составил Герхард Реерник.	
А. Коллекторные машины трехфазного тока	309
1. Применение и устройство	—
2. Якоря при питании трехфазным током	310
I. Трехфазный шунтовой двигатель	312
3. Соединение и принцип действия	—
4. Сдвиг фаз. Рабочие кривые	315
II. Трехфазный серийный двигатель	317
5. Соединение и принцип действия	—
6. Рабочие кривые	319
В. Однофазные коллекторные машины	321
1. Применение и устройство	—
2. Якорь машины постоянного тока в переменном поле	322
3. Момент вращения	324
I. Однофазный шунтовой двигатель	—
4. Схема и векторная диаграмма	—
II. Однофазный серийный двигатель	326
5. Соединение и диаграмма времени	—
6. Коммутация	327
7. Работа двигателя и рабочие кривые	329
III. Репульсионный двигатель	330
8. Схема и векторная диаграмма	—
9. Работа и рабочие кривые	332
II. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ. Составил Макс Цорн.	
А. Общие сведения о преобразователях	334
В. Одноякорный преобразователь	—
1. Общие сведения	—
2. Соотношения между напряжениями	336
3. Соотношения токов и джоулевых потерь в якоре	337
4. Коммутация	341
5. Регулирование напряжения	346
6. Реактивный ток и его зависимость от возбуждения	349
7. Параллельная работа	350
8. Пуск в ход	353
9. Расчет и схема соединения	355
10. Применение	357
С. Каскадный преобразователь	363
1. Общие замечания	—
2. Соотношения между напряжениями	365
3. Соотношения между токами	—
4. Пуск в ход	366
Д. Сравнение типов преобразователей	367

III. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ. Составил Ю. В. Гмихль.

А. Ртутный выпрямитель	370
1. Введение	—
2. Историческое развитие	372
3. Процессы в катде	—
4. Процессы в дуге	374
5. Процессы в анодах	375
6. Зажигание и потухание дуги	376
7. Нарушение вентильного действия. Обратные зажигания	377
8. Характеристика напряжения дуги	378
9. Условия нагрузки	379
10. Подсчет тока и напряжения	380
11. Коэффициент мощности и реактивная мощность	382
12. Коэффициент полезного действия	384
13. Нагревание и способность к перегрузке	385
14. Потенциал. Заземление	387
15. Трансформатор	388
16. Трансформатор однофазного тока	390
17. Трехфазный трансформатор с тремя вторичными фазами	392
18. Трехфазный трансформатор с шестью вторичными фазами	394
19. Типовая мощность трансформатора	396
20. Дроссельная катушка	—
21. Сглаживающая дроссельная катушка	397
22. Анодные дроссели	400
23. Отсасывающая дроссельная катушка	402
24. Стекланный выпрямитель	404
25. Мощный ртутный выпрямитель	407
В. Другие виды электрических выпрямителей	408
26. Аргонный выпрямитель	—
27. Выпрямитель с раскаленным катодом	409
28. Газовые выпрямители	410
29. Электролитические выпрямители	—
30. Механические выпрямители	—

IV. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ. Составил Зессингхаус.

А. Общие замечания	412
1. Руководящие соображения при построении электрических станций.	—
Основные понятия	—
II. Кривые нагрузок	413
III. Напряжения и числа периодов	415
В. Установки постоянного тока	—
I. Генераторы	—
II. Аккумуляторы	416
III. Схемы соединений	418
IV. Распределительные устройства	425
Г. Трехфазные установки	426
I. Генераторы	—
II. Трансформаторы	431
III. Схемы соединений	442
IV. Распределительные устройства	445
Д. Общее расположение электрических станций и подстанций	458
I. Электрические станции	—
II. Подстанции	465
Е. Линии передач и сети	473
I. Линии передач	—
II. Распределительные сети и т. д.	480

40969
РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР