

а 26640

Д. А. ЗАВАЛЛИНИН

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА



1938

~~Д Е П
6213
3132.~~

~~SECRET~~

1305376

)

~~17~~



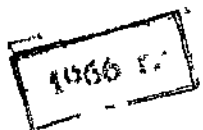
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
ЛЕНИНГРАД • 1938 • МОСКВА

89-2045-2

Рецензенты: проф. М. П. Костенко
проф. А. Я. Бергер

В книге рассматриваются основные физические и математические вопросы теории электрических машин постоянного тока, а также приводятся основные данные об устройстве и конструкции этих машин.

Книга предназначена для студентов вузов. Вместе с тем, книга может быть рекомендована начинающим инженерам, работающим в практических условиях.



ПРЕДИСЛОВИЕ.

Настоящий курс предназначен для студентов всех специальностей Электромеханического факультета Ленинградского индустриального института и переработан автором по предложению кафедры электрических машин ЛИИ.

Первое издание этого курса было написано автором для отделения электрификации Института механизации и электрификации социалистического земледелия, издано литографированным путем в незначительном числе экземпляров и разошлось полностью.

Второе издание включает в себе значительно пополненный и измененный курс машин постоянного тока.

В соответствии с методикой преподавания, принятой ЛИИ, в данном курсе отсутствует та общая вводная часть к курсу электрических машин, которая занимала значительное место в первом издании. Изложение курса начато с рассмотрения основных принципов действия машины постоянного тока, ее развития и конструктивных особенностей. При изложении последующего отдела обмоток автор придерживался метода, впервые введенного Рихтером (Richter) в его книге: „Ankerwicklungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen“ и достаточно прочно укоренившегося в методике преподавания электрических машин в ЛИИ.

Ввиду трудности этого метода автор дополнил отдел обмоток значительным иллюстрационным материалом как оригинальным, так и заимствованным из классических трудов Арнольда (Arnold) и Ля-Кура (La Cour) „Die Gleichstrommaschine“ и Рихтера „Ankerwicklungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen“, а также любезно предоставленным автору личным материалом проф. М. П. Костенко.

Обмотки якорей рассмотрены применительно к барабанному зубчатому якорю; о кольцевом якоре и его обмотке лишь упоминается в начале книги как об этапе, пройденном динамо-строением. Преобразование обмотки кольцевого якоря в обмотку якоря барабанного приведено по Рихтеру лишь для того, чтобы показать общность обмоток и пользоваться затем изображением кольцевого якоря там, где это желательно в видах простоты и ясности (например, при рассмотрении переключения секций при коммутации тока).

Отдел магнитной цепи и реакции якоря изложен согласно установившемуся материалу Гопкинсона (Hopkinson), Халь-Шоу

(Hale Show), Картера (Carter), Штейнмца (Steinmetz), Свенбэрна (Swinburne) и др., синтезированного Арнольдом и Рихтером.

Отдел коммутации тока подан автором согласно материалу проф. М. П. Костенко, предлагаемому им на лекциях в ЛИИ. Отдел пополнен изложением методики настройки дополнительных полюсов методом безискровой зоны, данным В. Т. Касьяновым.

Особо затронут вопрос о причинах искрения и кругового огня с точки зрения современных воззрений и опытов проф. О. Б. Брона. Отдел генераторов и их характеристик рассмотрен постольку, поскольку это необходимо для предварительной подготовки студентов к лабораторным занятиям; то же следует сказать и относительно отдела электродвигателей.

В отличие от первого издания книга дополнена отделом потерь и нагревания машин постоянного тока. Отделы эти изложены в соответствии с теми данными, которые были внесены в науку Байли (Baily), Рихтером, Петровым, Товером (Tower), Лаше (Lasche), Деттмаром (Dettmar), Кенелей (Kenelly), Жиро (Girault) и др. Особое внимание при изложении обращено автором на физическую сторону процессов.

Автор надеется, что книга его облегчит студентам изучение курса машин постоянного тока, так как существующие книги или не соответствуют программе и методике ЛИИ или же являются настолько объемистыми, что не укладываются в отводимое на изучение данного курса время.

В заключение автор выражает благодарность проф. М. П. Костенко, взявшему на себя труд редактирования рукописи и предоставившему в распоряжение автора ряд своих материалов в части обмоток и коммутации.

Д. Завалишин.

ГЛАВА I.

ВВЕДЕНИЕ В КУРС МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА.

1. Принцип действия электрической машины постоянного тока и основные элементы ее.

Электрический ток постоянного направления может быть получен на основе общего закона электромагнитной индукции с помощью двух принципиально различных методов.

Первый из этих методов, предложенный еще Фарадеем в 1831 г., носит название метода униполярной индукции.

Простейший прибор, использованный Фарадеем для получения постоянного тока, изображен на рис. 1. Он состоит из диска, помещенного в поле постоянного магнита. Диск этот может быть приведен во вращение с помощью рукоятки, посаженной на ось. В частях диска, находящихся в магнитном поле, возникают при вращении электродвижущие силы (э. д. с.), направленные по радиусам. Эти э. д. с. дают токи, замыкающиеся в диске через части его, не находящиеся в магнитном поле. Если

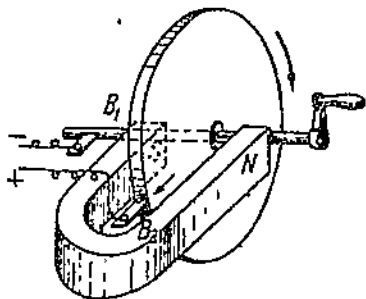


Рис. 1.

наложить на диск щетки и одну из них (B_2) расположить на его периферии, а другую (B_1) привести в контакт с осью, то можно получить ток во внешнем контуре, присоединенном к щеткам. При заданном сопротивлении внешнего контура и неизменной скорости вращения диска ток этот будет тем сильнее, чем ближе расположена щетка B_2 к середине магнита. При сдвиге этой щетки за пределы магнита тока во внешнем контуре, очевидно, не получится, так как щетка будет выведена из соприкосновения с радиусами диска, находящимися в магнитном поле.

Во все время нахождения соответствующей части диска в магнитном поле направление этого поля по отношению к данной части не изменяется, т. е. полярность поля остается одинаковой, отчего машина и получила название униполярной.

Та э. д. с., которая индуцируется вдоль радиусов диска,

не может быть сделана значительной, так как величина ее зависит от индукции поля между полюсами магнита и радиальной длины части диска, находящейся в поле. Пределы возрастания индукции, в случае постоянного магнита, ставятся, очевидно, возможным остаточным намагничиванием, диаметр же диска ограничен механическими соображениями. Недостатком униполярной машины, в простейшем ее виде, является также значительная потеря энергии и сильное нагревание диска из-за паразитных токов, замыкающихся помимо щеток в его толще. Путем последовательного соединения проводников, помещенных в поле постоянного направления, можно увеличить э. д. с. униполярной машины, сохранив приемлемые с конструктивной точки зрения диаметр вращающейся части и скорость ее вращения. Последовательное соединение проводников униполярной машины может быть, однако, осуществлено только через скользящий контакт колец, что весьма осложняет токособираение, так как на каждый активный проводник необходимо иметь в этом случае два кольца.

Принципиальная схема такой машины представлена на рис. 2. Здесь изображены неизменное поле, созданное концом постоянного магнита N , и три проводника, вращающиеся по направлению стрелки. Кольца, присоединенные попарно к проводникам, соединены между собой последовательно. Практически, конечно, магнитное поле может быть создано электромагнитом.

На создание технически совершенной униполярной машины было потрачено много сил и энергии лучшими электротехниками своего времени. Американским инж. Ламме (Lamme) была сконструирована униполярная машина мощностью 2000 kW. Эта машина была построена в Америке фирмой Вестингауз (Westinghouse) и работала некоторое время, но была затем заменена машиной другого типа.

В настоящее время униполярные машины имеют все же некоторое распространение. Они применяются для измерительных целей. Вполне возможно применение этих машин и в радиотехнике для питания цепей накала радиоустройств. Малое внутреннее сопротивление таких машин, а также постоянное напряжения делают их весьма ценными в схемах питания цепей накала приемных и усилительных радиоустройств. Требуемое в этих случаях напряжение от 6 до 35 V униполярная машина может легко обеспечить.

Второй метод получения постоянного тока основывается на принципе выпрямления переменного тока помощью особого переключателя, называемого „коллектором“. Для выяснения принципа выпрямления обратимся к рис. 3, на котором изображен виток, состоящий из двух проводников, помещенных в постоянное поле магнита или электромагнита. Виток, находясь в расточке магнита, может вращаться вокруг оси aa . Концы витка присоединены к двум изолированным друг от друга половинкам кольца (1 и 2), которые замыкаются на внешнюю

цепь с помощью щеток. Разрезанное (в простейшем случае на две части) кольцо носит название коллектора и выполняет роль выпрямителя тока.

Представим себе, что виток вращается в магнитном поле в направлении, указанном стрелкой, с равномерной скоростью. Тогда в части витка, расположенной под правым полюсом (N), индуцируется э. д. с., направленная так, как показано на рис. 3 стрелкой. В левой стороне витка э. д. с. имеет противоположное направление. Вследствие соединения сторон витка между собой в один контур (рис. 3) получается суммирование э. д. с. по контуру, и результирующая э. д. с. определяется в каждый момент суммой э. д. с. отдельных сторон. Электродвижущая сила, индуцированная в витке, имеет, очевидно, неизменное направление до тех пор, пока стороны витка перемещаются каждая в поле неизменной полярности.

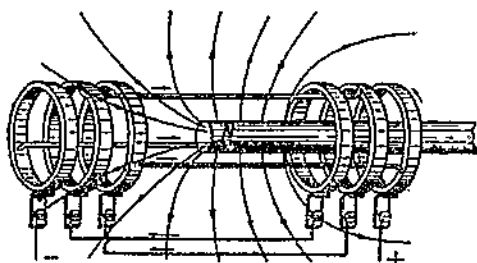


Рис. 2.

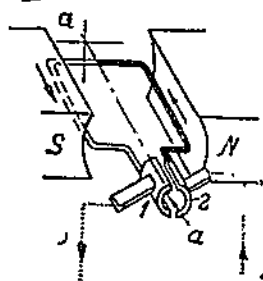


Рис. 3.

Как только виток при своем вращении перейдет плоскость, перпендикулярную к направлению поля, стороны витка попадут в поле противоположной полярности и направление э. д. с. в них изменится. Через половину полного оборота виток опять возвратится в прежнее свое положение, а вместе с тем изменится и знак э. д. с. Таким образом в витке индуцируется э. д. с. переменного направления.

Разность потенциалов между полукольцами коллектора (коллекторными пластинами) изменяется в такт с изменением э. д. с. витка, в то время как на щетках, вследствие соприкосновения каждой щетки только с коллекторной пластиной, соединенной со стороной витка, находящейся в сфере действия полюса определенной полярности, знак э. д. с. не меняется. Если электродвижущая сила e между пластинами коллектора может быть изображена в функции времени согласно рис. 4, а, то для щеток имеем кривую рис. 4, б. Как видно из рис. 4, а, б, э. д. с. сохраняет неизменное направление, несмотря на резко пульсирующий характер.

Первое усовершенствование, которое надлежит поэтому ввести в принципиальную схему рис. 3, сводится к уменьшению пульсаций э. д. с. Последнее легко достижимо в том случае, если в расточке электромагнита расположить железный

цилиндр с наложенными на него несколькими сдвинутыми друг относительно друга витками. Витки надлежит распределить равномерно по поверхности цилиндра. В соответствии с увеличенным числом витков, наложенных на вращающуюся часть, необходимо увеличить и число коллекторных пластин; примем их поперечному по две на виток (рис. 5).

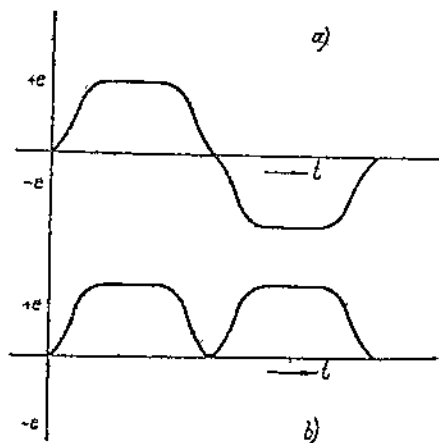


Рис. 4.

первого витка синусоиду э. д. с. (1). Такие синусоиды получим и для других двух витков, причем эти синусоиды будут сдвинуты во времени каждая на $\omega t = 120^\circ$, где ω — угловая скорость перемещения якоря и t — время, прошедшее от момента прохождения первым витком середины расстояния между осями полюсов. Каждый виток будет находиться в соприкосновении со щетками в промежутке времени, соответствующий угловому

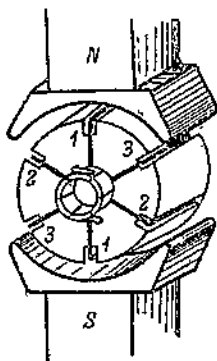


Рис. 5.

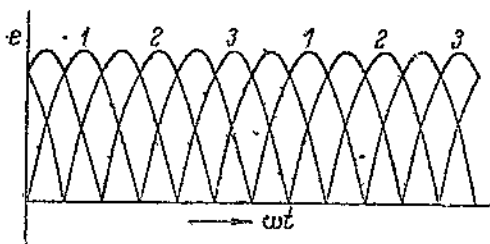


Рис. 6.

перемещению его на $\frac{360}{6} = 60^\circ$. Если при этом щетки располагаются точно против середины полюсов, то получится изменение разности потенциалов на щетках, показанное на рис. 6 жирной линией. Пульсаций получают при этом значительно меньшими, чем при одной паре пластин. Увеличивая число

витков и, соответственно, число коллекторных пластин, можно свести пульсации до практически пренебрегаемой величины. Количественные соотношения между числом коллекторных пластин и величиной пульсации э. д. с. будут даны в дальнейшем.

Если, однако, путем устройства достаточного числа коллекторных пластин удастся добиться достаточного постоянства э. д. с. коллекторной машины, близкого к постоянству э. д. с. машины униполярной, то первый тип машины (коллекторная) имеет неоспоримое преимущество перед вторым в отношении достижимой величины индуктируемой э. д. с. В самом деле, можно каждые две пластины (схемы рис. 3 и 5) соединить не одним витком, а несколькими витками, как это показано на рис. 7. Тогда к двум коллекторным пластинам окажется присоединенной секция, состоящая из нескольких витков. В предыдущих случаях мы также имели между двумя коллекторными пластинами секцию, но состоящую только из одного витка. Подчеркиваем, однако, что в общем случае к двум коллекторным пластинам может быть присоединена секция, состоящая как из одного, так и из нескольких витков. Разумеется, что в случае K коллекторных пластин получится $\frac{K}{2}$ секций при w витках в каждой из них.

Увеличивая число витков, присоединенных к паре пластин коллектора, в w раз, мы увеличиваем во столько же раз э. д. с. машины, благодаря последовательному соединению витков. Отсюда очевидна возможность получения от коллекторной машины достаточно высоких напряжений.

Схема коллекторной машины при достаточном числе коллекторных пластин и ряде витков в секции обладает, однако, тем недостатком, что в каждый момент между щетками находятся витки, принадлежащие только одной секции. Все остальные секции остаются при этом неиспользованными. Другими словами, в каждый момент времени работает лишь $\frac{2}{K}$ -ая часть обмотки. Последнее очень невыгодно с точки зрения затраты материала (меди) на обмотку машины.

Улучшение использования активного (рабочего) материала машины может быть получено в том случае, если от разомкнутой обмотки (рис. 5) перейти к обмотке, замкнутой на себя.

На рис. 8 изображен простейший случай такой обмотки, когда она имеет только одну пару коллекторных пластин. Вместо одной секции, приходившейся на пару коллекторных пластин,

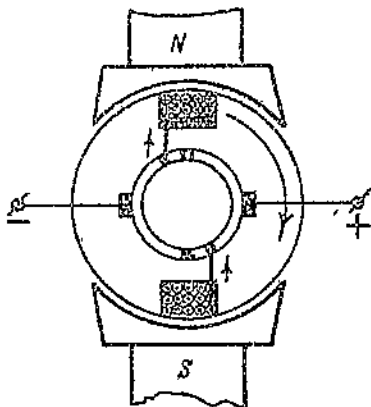


Рис. 7.

мы здесь имеем две секции, присоединенные к одним и тем же пластинам с двух сторон. Вращающаяся часть машины (якорь) выполнена в виде полого цилиндра, причем каждая секция имеет одну сторону (например, 1), лежащую на внешней, и другую — на внутренней окружности якоря. Магнитный поток полюсов проходит так, как показано на рис. 8 пунктиром, вследствие чего а. д. с. индуцируется лишь во внешней стороне секции,¹⁾ тогда как внутренняя ее сторона является неактивной и служит лишь для замыкания тока. Как видно, секции дают ток одновременно, причем при заданном на рис. 8 напра-

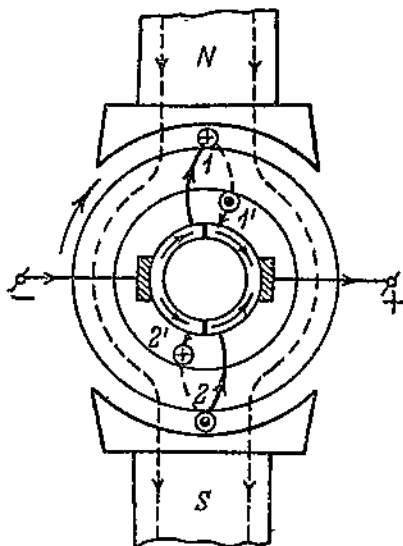


Рис. 8.

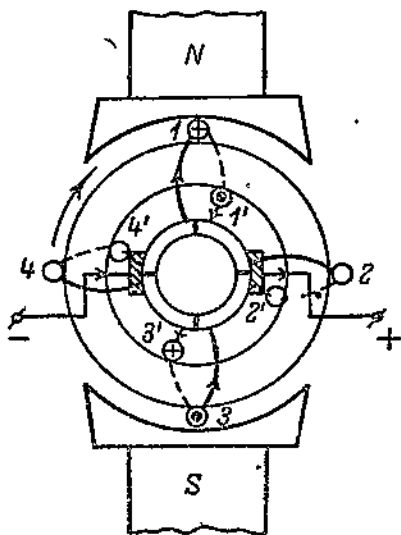


Рис. 9.

влении вращения якоря по стрелке часов и магнитном потоке, направленном сверху вниз, правая щетка будет положительной, а левая — отрицательной. Ввиду присоединения обеих секций к одним и тем же пластинам коллектора, секций, посаженные на кольцо якоря, оказываются замкнутыми в одну непрерывную цепь, отчего обмотка и носит название замкнутой обмотки кольцевого якоря. При большем числе коллекторных пластин, применяемом и здесь для уменьшения пульсаций а. д. с., схема обмотки получается согласно рис. 9. Эту схему можно упростить, так как секции могут быть соединены между собой последовательно, причем в месте этого соединения может быть сделан только один отвод к коллектору, вместо двух присоединений каждой секции в отдельности. Таким образом получаем схему рис. 10. Общий вид обмотки хорошо иллюстрирует рис. 11, на котором показана обмотка кольцевого якоря, состоящая из 12 секций. Преимуществом такой обмотки перед ра-

¹⁾ Секция, конечно, также может состоять из ряда витков.

замкнутой является то, что э. д. с., индуктированные в отдельных секциях, здесь складываются. Так, например, на рис. 12, схематически изображающем ту же машину (рис. 11), последовательно соединены пять секций, лежащих под северным полюсом, и столько же секций — под южным

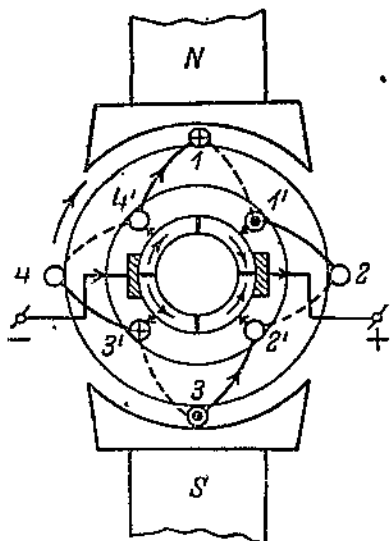
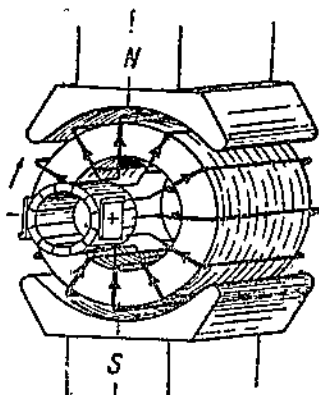


Рис. 10.



ными пластинами (рис. 8), имеем две активные стороны секции (1, 2) и две неактивные (1', 2'). Легко, однако, сделать стороны 1' и 2' активными, если вынести их на наружную поверхность якоря и поместить в соответствующих магнитных условиях (рис. 13). В таком случае каждая из двух секций имеет стороны, лежащие под обоими полюсами, причем э. д. с. индуцируются в них так же, как в разомкнутой обмотке. По существу получается то же, что и в разомкнутой обмотке при двух секциях, присоединенных в параллель к двум пластинам коллектора: одна секция как бы замыкается через другую. Предположим далее, что якорь имеет пазы для укладки обмотки в два слоя в целях ее закрепления и лучшего изолирования, и повер-

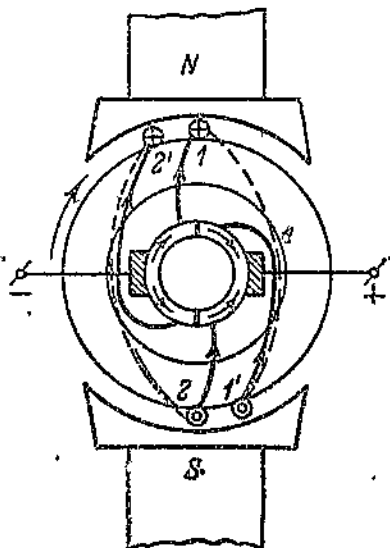


Рис. 13.

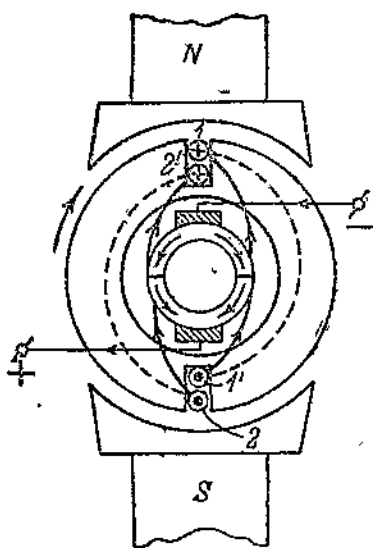


Рис. 14.

нем коллектор вместе со щетками на угол в 90° в целях выравнивания длины соединений между активными сторонами секций и коллектором (рис. 14). Тогда наверху пазов будут находиться те секционные стороны, которые в схеме кольцевой обмотки были активными до вынесения внутренних неактивных сторон. Внизу пазов будут вынесенные, теперь уже активные стороны. Очевидно, что при том же магнитном потоке и той же скорости вращения якоря э. д. с. машины с барабанной обмоткой получается вдвое большей, чем в машине с кольцевой обмоткой.

Преобразование, выполненное нами для машины с двумя коллекторными пластинами, легко может быть произведено и для машины с любым числом коллекторных пластин. Так, например, при четырех коллекторных пластинах получается (рис. 15) схема обмотки кольцевого якоря (а) и соответствующая ей схема барабанного якоря (б).

Рассматривая схему простейшей замкнутой обмотки барабанного якоря и сравнивая ее с другими типами обмоток — разомкнутой барабанной и замкнутой кольцевой, замечаем в них следующие существенные различия. Замкнутая барабанная обмотка хотя по схеме ничем не отличается от кольцевой, но имеет число активных сторон секций в два раза большее. Число секций любой замкнутой обмотки по сравнению с разомкнутой при одном и том же числе коллекторных пластин всегда вдвое больше, т. е. число секций $S = K$.

Выполнение обмотки барабанного якоря всегда проще, чем кольцевого, так как отдельные элементы обмотки — секции — могут быть изготовлены заранее и затем уложены в пазы в порядке, определяемом схемой обмотки. Расход активного материала (меди) при замкнутой обмотке барабанного якоря должен быть минимальным, так как за исключением нескольких секций, замкнутых щетками накоротко, все стороны секций активны и участвуют в генерировании общей э. д. с. В дальнейшем мы подробно рассмотрим лишь замкнутые обмотки барабанного якоря, схемой же кольцевой обмотки будем пользоваться только изредка для целей упрощения изображения обмотки, так как по своим электрическим свойствам барабанная замкнутая обмотка ничем не отличается от кольцевой (первая получается из второй при отсутствии каких-либо нарушений в схеме соединений).

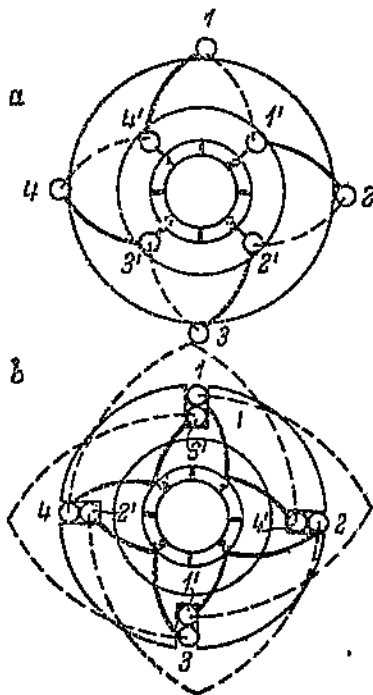


Рис. 15.

Все изображенные до сих пор схемы машины постоянного тока имели число полюсов, равное двум. Однако на практике в машинах постоянного тока, почти как правило, приходится отступать от этого числа и применять четыре, шесть, восемь и т. д. полюсов, т. е. две, три, четыре и т. д. пары полюсов. При таком увеличении числа полюсов мы как бы удваиваем или утраиваем машину, совмещая в ней p машин, где p — число пар полюсов. В соответствии с этим та дуга окружности якоря, на которой действует данный полюс, уменьшается по мере увеличения числа полюсов. Так, в четырехполюсной машине в сфере действия каждого полюса находится дуга, приходящаяся на угловое расстояние в 90° , а не 180° , как то имело место в двухполюсной машине. Если считать (как это часто делают по ана-

логии с двухполюсной машиной) дугу якоря, приходящуюся на один полюс, за 180° электрических, то в двухполюсной ма-

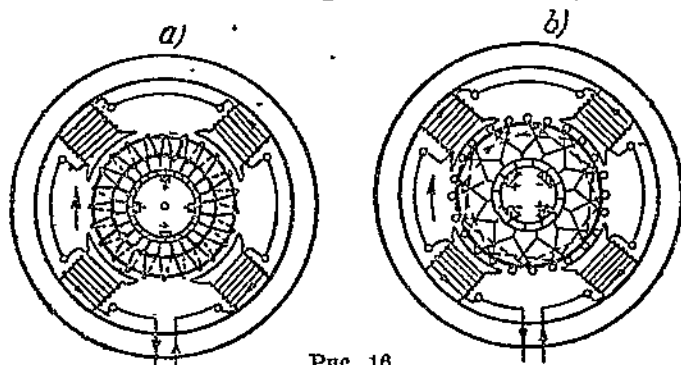


Рис. 16.

шине эта дуга, выраженная в пространственных градусах α_1 , равна той же дуге, выраженной в градусах электрических α_e , а в многополюсной машине:

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_e}{p}.$$

На рис. 16 даны схемы четырехполюсной машины. На рис. 16, а представлена схема машины с замкнутой обмоткой и кольцевым якорем, а на рис. 16, б — та же машина с барабанным якорем.

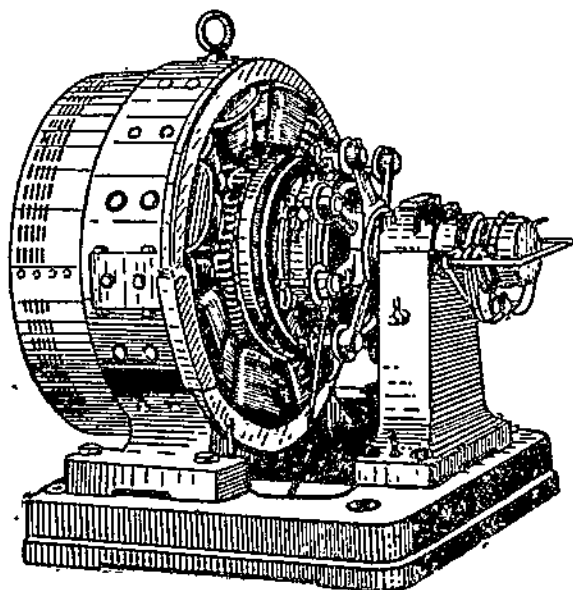


Рис. 17, а.

Число щеток здесь уже четыре (по числу полюсов), так как необходимо снимать ток с обмотки в местах его раздела, которых в данном случае будет четыре. На схемах показана также обмотка электромагнитов (полюсов), несущая обычно название обмотки возбуждения. Обмотка эта питается постоянным током, вырабатываемым самой машиной или же доставляемым от

отдельного источника тока (аккумуляторной батареи, вспомогательной машины — возбуждителя).

Рассмотрев основные схемы обмоток и выяснив принцип действия машины постоянного тока, приведем еще некоторые

данные об отдельных элементах машины, упоминавшихся выше.

Вращающаяся часть машины постоянного тока, как мы уже знаем, называется якорем (по виду ее в первых типах машин — см. рис. 7) и несет замкнутую обмотку, состоящую из отдельных секций. Стороны секций уложены в пазы на поверхности железа якоря. Секции присоединены к коллектору, состоящему из ряда медных пластин, разделенных изоляцией. На коллектор наложены щетки.

Неподвижная часть машины состоит из ярма, служащего магнитопроводом для потока, создаваемого обмоткой возбуждения полюсов, полюсных выступов, снабженных полюсными наконечниками, и катушек возбуждения, надетых на полюсные

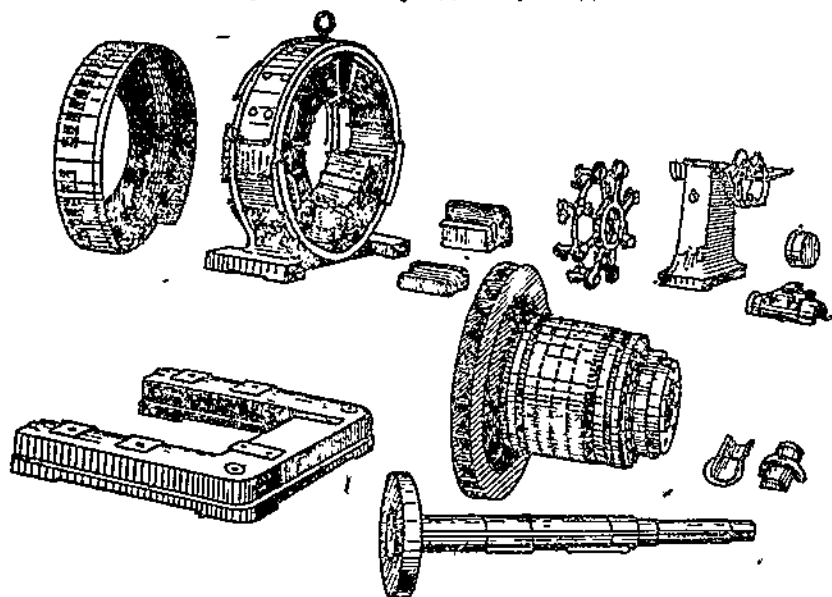


Рис. 17, б.

выступы. Кроме главных полюсных выступов, часто устраивают добавочные. Роль их состоит в том, чтобы обеспечить бесискровое снятие тока щетками с коллектора. На рис. 17, б показана машина постоянного тока мощностью в 50 kW в разобранном виде. Общий вид той же машины в собранном виде дан на рис. 17, а. На рис. 18 дана фотография машины ПН 45 всесоюзной серии. Мощность машины 4,5 kW при 1430 об/мин.

2. Развитие электрических машин постоянного тока и их современное состояние.

Как было указано выше, первой электрической машиной постоянного тока является униполярная машина (выполненная Фарадеем в 1831 г.), изображенная на рис. 1. Ее основные недостатки заключаются в малой в. д. с. и значительной потере энергии вследствие токов в диске. Ле Ру (Le Roux) улучшил

эту униполярную машину, создав такую конструкцию, в которой э. д. с. индуктировалась по образующим цилиндра, причем, вследствие равномерного поля по всей окружности цилиндра; отдельные точки окружности его имели одинаковый потенциал, это вело к отсутствию паразитных токов в цилиндре и лучшему коэффициенту полезного действия машины. Однако дальнейшие попытки создать экономичную и надежную униполярную машину не увенчались успехом.

Коллекторная машина постоянного тока обязана своим возникновением Пикси (Pixii), который вскоре после Фарадея открыл принцип переключения (коммутирования) тока помощью коллектора.

Этот принцип коммутирования, будучи применен к обмотке двойного Т-образного якоря Сименса (1856 г.), дал возможность создать первую машину постоянного тока (схема рис. 7).

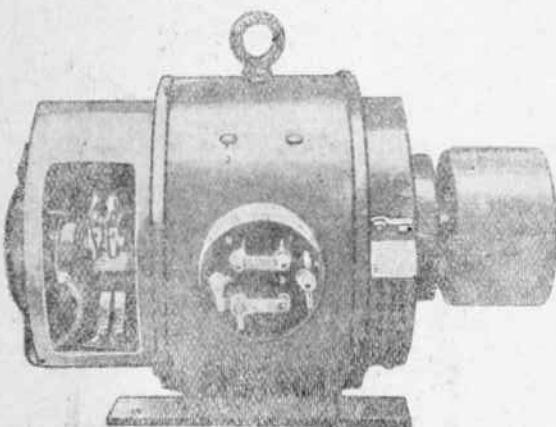


Рис. 18.

Изобретение Пачинотти в 1860 г. кольцевого якоря с замкнутой обмоткой, подобного изображенному на рис. 11, сильно содействовало усовершенствованию машины постоянного тока. Особо значительный толчок получило развитие этой машины в 1867 г., когда Вернер Сименс (Werner Siemens) открыл так называемый динамоэлектрический

принцип, т. е. явление самовозбуждения электрических машин. Принцип этот основывался на открытии Вильде (Wilde), предложившего в 1862 г. применять для создания магнитного поля электрической машины электромагнит. В 1870 г. Грамм (Gramm), независимо от Пачинотти, вновь изобрел обмотку, предложенную в свое время Пачинотти, после чего обмотка эта применялась до 1872 г., когда Гефнер Альтенекком был изобретен барабанный якорь с замкнутой обмоткой.

В дальнейшем, в 1882 г., Венштром (Wenström) впервые применил укладку обмотки якоря в пазы, что завершило конструктивное оформление вращающейся части машины.

Последнее существенное улучшение в конструкцию машины постоянного тока было внесено Манжесом (Manges), предложившим в 1884 г. дополнительные полюса для улучшения коммутации тока машины. Однако еще до применения дополнительных полюсов машина постоянного тока получила широкое практическое применение и занимала преобладающее положение

ние среди других типов электрических машин до 1875 г., когда был изобретен первый технический трансформатор. На рис. 19 дан общий вид установки генераторной станции передачи энергии Мизбах — Мюнхен в 1882 г. Установка была оборудована генератором постоянного тока мощностью в 1,5 ЛС при напряжении в 2000 В. Передача осуществлялась на расстоянии в 57 км. Переданная электрическая энергия служила для создания водопада на выставке в Мюнхене.

С появлением трансформатора положение генератора постоянного тока было поколеблено, так как наличие трансформатора позволило поднять напряжение переменного тока до таких значений, при которых передача энергии на значительные расстояния оказывалась более экономичной на переменном токе. Постоянный ток был значительно оттеснен на второй план после изобретения в 1891 г. Доливо-Добровольским трехфазного асинхронного двигателя и усовершенствования (после 1900 г.) турбогенераторов трехфазного тока.

Широчайшее распространение турбогенераторов трехфазного тока, экономичность передачи этого тока при высоком напряжении и удобство распределения, а также хорошая работа электродвигателей при этого рода токе обеспечивают его распространение. Однако в самое последнее время вопрос о дальнейшем распространении трехфазного тока упирается, с одной стороны, в проблему передачи энергии при сверхвысоких напряжениях, а с другой — в вопрос регулирования скорости электродвигателей, столь

необходимом при распространении одиночного привода станков. Проблема передачи энергии при напряжениях порядка 500 кВ на расстоянии 1000 и более километров разрешается легче на постоянном токе, чем на переменном. Однако применение здесь постоянного тока встречает затруднения как при генерировании тока, так и, особенно, при его распределении. Вопрос генерирования частично разрешается последовательным включением ряда машин постоянного тока, как это уже практиковалось в некоторых иностранных установках, построенных еще в начале текущего столетия. В современных машинах постоянного тока представляется возможным иметь до 10 кВ на одном коллекторе при мощности машины



Рис. 19.

порядка 8000 kW.¹⁾ При двух коллекторах можно получить 20 kV от одной машины, а при сдвоенном агрегате — 40 kV; последнее дает при 10 последовательно включенных машин до 400 kV.

Установка с рядом последовательно включенных машин получается, однако, весьма громоздкой. Мощность генерирую-

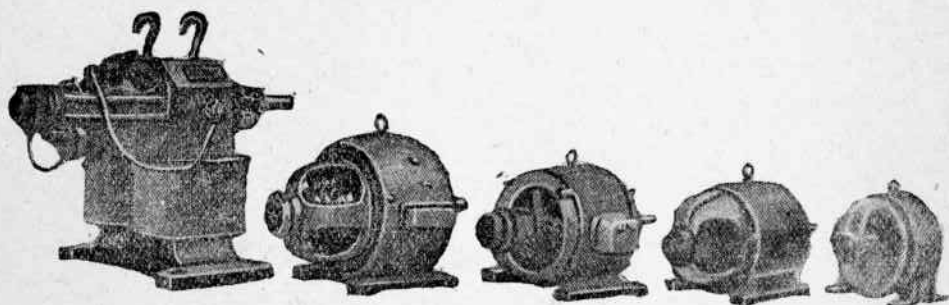


Рис. 20, а.

щей единицы также мала по сравнению с современными генераторами переменного тока (до 200 000 kW в одной единице).

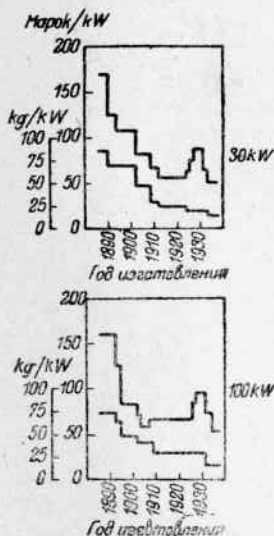


Рис. 20, б.

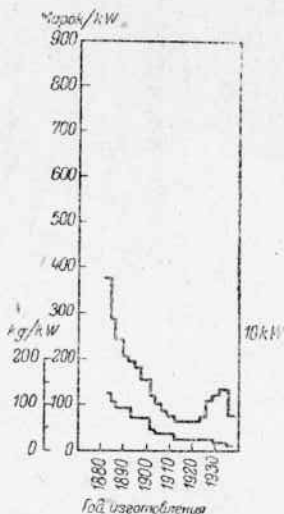


Рис. 20, в.

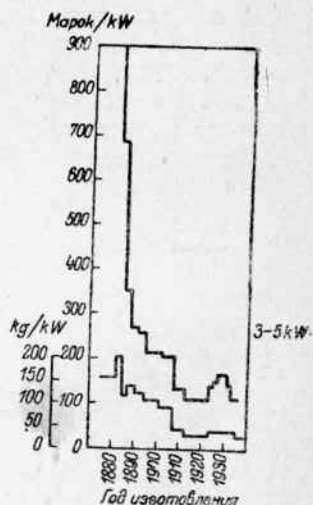


Рис. 20, д.

Значительные затруднения представляет также распределение электрической энергии при постоянном токе высокого напряжения, так как постоянный ток не может быть трансформирован статическим аппаратом — трансформатором. Все распределение энергии придется поэтому вести переменным током. В тех слу-

¹⁾ См. R. Thury, „ETZ“ 1930, Н. 4, S. 114.

чаях, когда требуется постоянный ток для двигателей регулируемых приводов, можно с успехом пользоваться ртутным выпрямителем, представляющим в современном выполнении весьма совершенный аппарат.

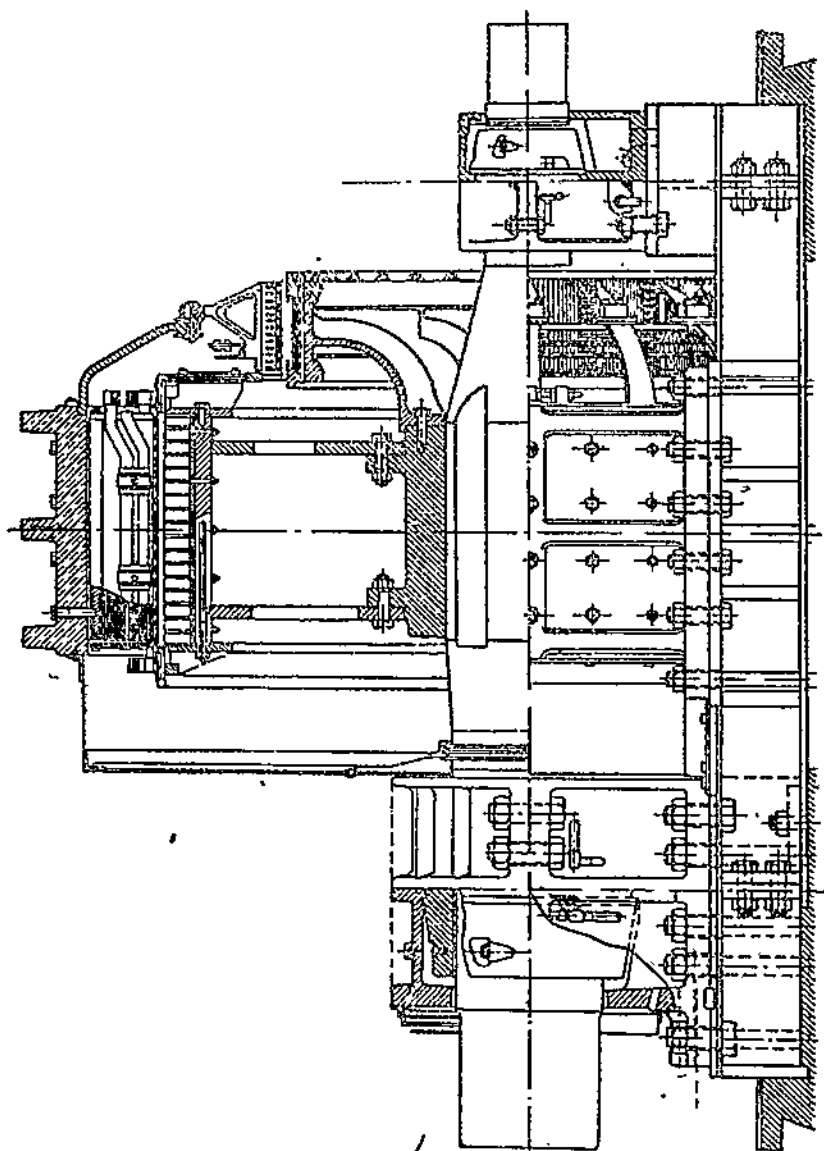


Рис. 21.

Машина постоянного тока в своем развитии прошла через целый ряд резко разнящихся между собой конструктивных форм. Современная машина постоянного тока, имея те же основные части, что и машина конца прошлого столетия, резко раз-

няется от последней по своему конструктивному оформлению, размерам, весу и стоимости.

На рис. 20, *a* дана фотография ряда машин фирмы AEG производства с 1893 г. по 1928 г. Несмотря на то, что мощности всех приведенных здесь типов почти одинаковы, линейные размеры машин уменьшились примерно в два раза, а вес упал в 6 раз.

На рис. 20, *b, c, d* даны кривые стоимости и веса машин постоянного тока в зависимости от времени их изготовления.

Кривые относятся к машинам фирмы AEG.

Столь значительные успехи, достигнутые в динамостроении, объясняются в основном: усовершенствованием методов расчета, улучшением качества применяемых материалов и усовершенствованием вентиляции. Значительное облегчение и удешевление производства больших машин было получено в самое последнее время путем введения сварных конструкций, когда большинство частей машин, изготовлявшихся ранее путем отливки из стали или чугуна, начали изготовлять путем кислородной резки листов железа и сварки их затем в требуемую конструкцию помощью электрической дуги.

Современные машины постоянного тока строятся,

начиная от мощностей порядка долей киловатта до мощностей в 6000—7000 kW. Представляется возможным построить машину мощностью в 10 000 kW при 250 об/мин, применив новейшие успокоители пазовых полей по Треттину (Trettin).

В СССР построены двигатели в 5150 kW (7000 ЛС) при напряжении 750 V и скорости вращения 50—120 об/мин. Двигатели эти установлены на блюмингах. Вес такого двигателя, включая фундаментную плиту, равен 170 t, при весе якоря с валом 6,63 t. Двигатель имеет 24 главных полюса, дополнительные полюса и компенсационную обмотку. На рис. 21 дан разрез этого двигателя в исполнении завода „Электросила“ им. С. М. Кирова. На рис. 22 дана фотография якоря этой машины в стадии его изготовления. В последнее время на заводе „Электросила“ построен двоярный двигатель мощностью

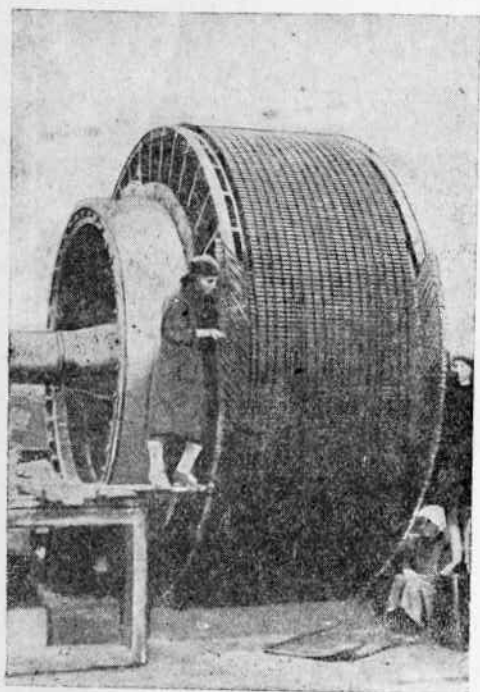


Рис. 22.

в 13 600 kW при 214 об/мин, что дает мощность каждого якоря в 6800 kW.

Харьковский электромеханический завод (ХЭМЗ) выпустил ряд агрегатов, состоящих каждый из синхронного двигателя мощностью в 10 000 kVA и двух сдвоенных генераторов постоянного тока на общую силу тока 26 000 А при напряжении 350 В.

Машины фирмы AEG, установленные на алюминиевом заводе близ Званки (на Волхове), дают эти же 26 000 А не с четырех коллекторов, а с двух, что составляет 13 000 А на один коллектор.

Предельная мощность машин постоянного тока не ограничивается, однако, приведенными выше цифрами. В ближайшее время можно будет говорить о токе с одного коллектора порядка 20 000 А при напряжении до 1000 В, что дает мощность в 20 000 kW.

Что касается до предельных напряжений машин постоянного тока, то выше была дана цифра 10 kV на одном коллекторе, как достижимая в мощных машинах. Давно уже были построены машины мощностью в 1125 kW при напряжении 7500 В для системы энергоснабжения Липона (во Франции). В малых машинах, применяемых в технике связи, имеем напряжения, доходящие до 30 000 В на одном коллекторе.

3. Основные элементы конструктивного оформления машин постоянного тока.

Вращающаяся часть машины постоянного тока, называемая якорем, состоит из сердечника, якорной звезды и обмотки.

Железный сердечник, служащий для проведения вступающего в якорь со стороны полюсов магнитного потока, выполняется из отдельных дисков. Эти последние штампуются из железных листов толщиной $\Delta = 0,5$ mm, оклеиваются с одной стороны тонкой бумагой (толщиной 0,02—0,03 mm) или лакируются особым изолирующим лаком. Диски собирают затем в пакеты якорного железа, каждый толщиной в 5—6 см. Отдельные пакеты насаживают на вал или якорную звезду, сидящую на валу, причем между пакетами устраивают промежутки, называемые вентиляционными каналами. Промежутки эти служат для прохода воздуха, охлаждающего якорь, и осуществляются путем приварки или приклейки к крайним листам пакетов распорок. Такое сложное строение якоря (вид и разрез якоря с коллектором, см. рис. 23) совершенно необходимо для того, чтобы избежать значительных потерь в этой части машины и высокого нагрева ее.

При вращении якоря в магнитном поле в железе его, так же, как и в меди обмотки, индуктируются э. д. с. Эти э. д. с. способны создать в якоре паразитные токи, которые при малом сопротивлении якорного железа могут быть весьма велики. Для уменьшения этих токов железо якоря разделяют на ряд отдель-

ных тонких листов. Благодаря изолирующим прослойкам между листами, а также повышенному сопротивлению применяемого здесь специального железа, паразитные токи значительно ослабляются.

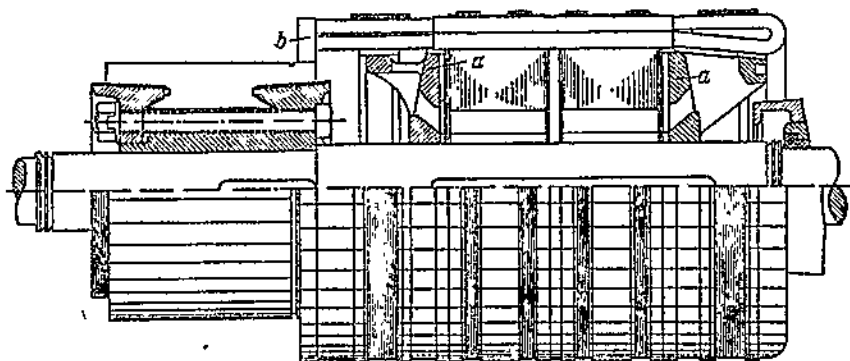


Рис 23.

Крепление железных пакетов на якоре производится с помощью нажимных шайб *a* (рис. 23) или болтов (рис. 24). Последние во избежание замыкания отдельных листов между собой должны быть изолированы от железа прессшпановыми ¹⁾ гильзами.

Диски якорного железа выполняются из цельных колец лишь для машин малой мощности (при диаметре якоря менее 100 см). В больших машинах диски выполняются из ряда

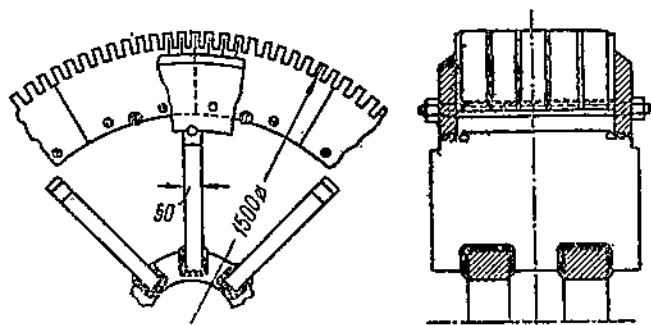


Рис. 24, а.

сегментов, которые накладываются внахлестку один ряд на другой для перекрытия стыков, что необходимо для создания равномерного магнитного сопротивления железа якоря по всей окружности (рис. 24, а). На рис. 24, б дана фотография, показывающая якорь крупной машины в момент стягивания нажимными болтами якорного железа.

¹⁾ Прессшпан — прессованный картон.

В каждом листе якорного железа должны быть проштампованы пазы, чтобы по сборке железа в пакеты получить те впадины, в которые укладывается обмотка. Лист якорного железа

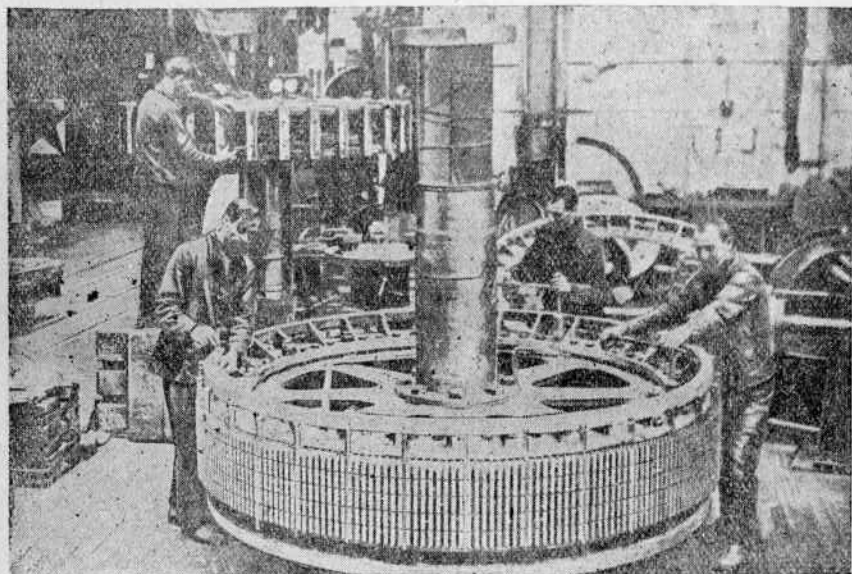


Рис. 24, б.

со впадинами показан на рис. 25. Впадины имеют, обычно, прямоугольную форму. Два вида впадин с уложенной в них обмоткой даны на рис. 26. В первом случае закрепление проволоочной обмотки произведено с помощью бандаж (рис. 26, а); во втором—обмотки стержневой с помощью деревянного клина (рис. 26, б).

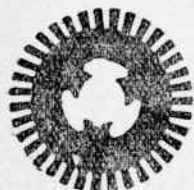


Рис. 25.

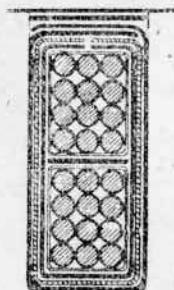


Рис. 26, а.

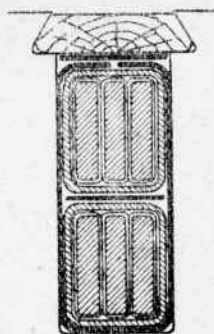


Рис. 26, б.

Обмотка якоря заготавливается в виде отдельных секций, причем на особых шаблонах придают секциям такую форму, которая облегчает укладку их во впадины (три секции волновой обмотки, приготовленные к укладке на якорь, пока-

заны на рис. 27). Как видно из рис. 28, в каждой впадине лежат две секционные стороны — одна внизу, другая наверху.

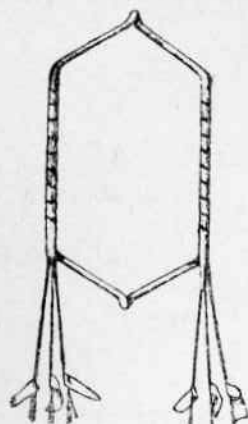


Рис. 27.

Концы секций присоединяются после укладки всей обмотки к коллекторным пластинам. На рис. 29 показан общий вид якоря с коллектором в стадии выполнения обмотки машины. Рис. 29, а дает якорь с шестью секциями; рис. 29, б — тот же якорь в

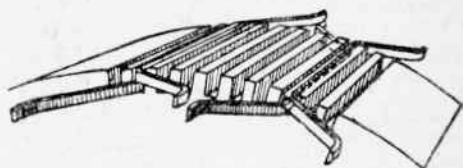


Рис. 28.

полуобмотанном состоянии; рис. 29, в — вид якоря с уложенной обмоткой; рис. 29, г показывает готовый якорь с бандажами и вентилятором.

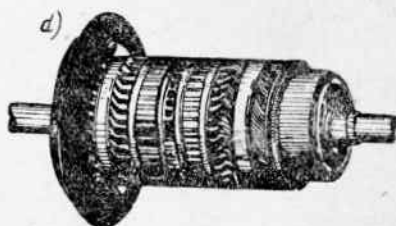
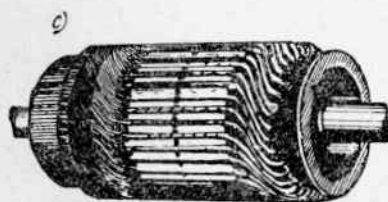
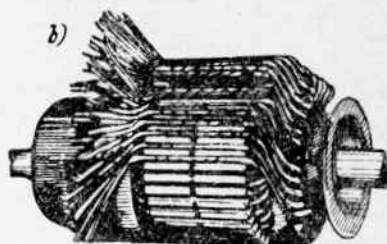
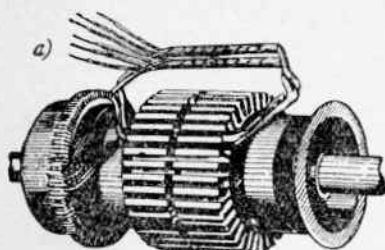


Рис. 29.

Коллектор состоит из ряда пластин, изготовленных из твердотянутой меди и разделенных прокладками из прессшпана

или миканита.¹⁾ Пластины и прокладки между ними собираются в один цилиндр и закрепляются в таком виде на коллекторной буксе. На рис. 30 показан в разрезе коллектор, применяемый в машинах малой мощности. Здесь *A* — корпус коллектора (букса), *B* — нажимное кольцо, *K* — коллекторная пластина, *M* — миканитовая изоляция, *N* — болт, стягивающий буксу и кольцо. Пластины коллектора имеют ширину 5—8 мм (иногда и более, в зависимости от мощности и тока, отдаваемого машиной). Изоляция между пластинами при напряжении до 500 В имеет в прессованном состоянии толщину порядка 0,6—1 мм.

На конструкцию отдельных частей и сборку коллектора надлежит обращать особое внимание, так как он должен сохранять строго цилиндрическую форму при всех колебаниях температуры, имеющих место в машине. Вследствие трения щеток и потерь в переходном слое между пластинами и щетками, нагрев коллектора может быть весьма значительным (допускается нагрев до 95°С). При этом получаются значительные внутренние напряжения, которые могут настолько деформировать коллектор, что работа щеток на нем станет неудовлетворительной вследствие искрения.

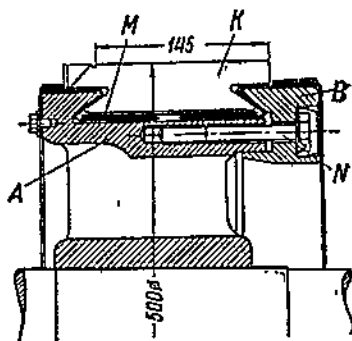


Рис. 30.

Соединения между обмоткой якоря и коллектором при малых мощностях машин осуществляются непосредственно теми же проводниками, из которых выполнена обмотка. В машинах значительной мощности, когда проводники обмотки якоря изготовлены в виде медных стержней (что всегда имеет место, если ток в проводнике более 80 А), соединения эти осуществляются помощью особых медных пластин, так называемых „петушков“ (в рис. 23).

Щеточная система, предназначенная для собирания тока с коллектора машины, состоит из трех основных частей: щеток, щеткодержателей и щеточной траверзы.

Щетки угольные или графитовые прямоугольной формы (рис. 31) имеют ширину по окружности коллектора от 5 до 30 мм. Длина щеток (в направлении оси машины) — 5—50 мм. Если при большом токе, отдаваемом машиной, необходимо иметь большую длину щетки, то устанавливают несколько штук их, длиной не более 50 мм каждая, так как при большей длине трудно обеспечить надежный контакт между всей трущейся поверхностью щетки и коллектором. Для надежности работы щеток в каждой зоне, где снимается ток, ставят, обычно, не менее двух отдельных щеток.

¹⁾ Миканит — листы, склеенные из тонких слюдяных пластинок помощью изолирующего состава.

Необходимый для надежного контакта нажим и закрепление щетки осуществляются помощью щеткодержателя. На рис. 32 показан вид такого щеткодержателя. Здесь *a* — щетки, *b* — обойма, *c* — нажимные пластины, *d* — пружина, *e* — токоведущие проводники, *f* — кольцо для крепления к пальцу траверзы.

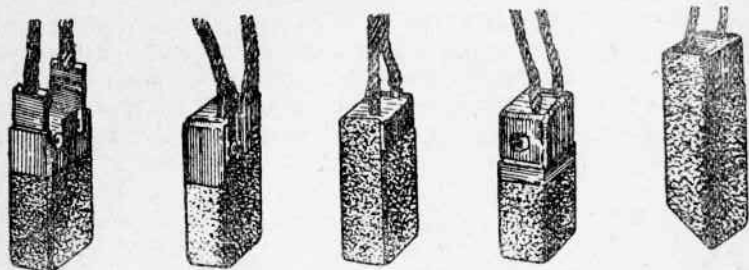


Рис. 31.

Щеточная траверза показана на рис. 33. Пальцы траверзы изолированы от остальной части ее помощью трубок и шайб, изготовленных из изолирующего материала. Траверза в малых машинах чаще всего крепится к подшипнику, в больших же — к ядру (рис. 34).¹⁾ Отдельные пальцы траверзы одинаковой полярности (т. е. через один) соединяются между собой помощью медных собирательных шин. Ток от этих шин отводится затем

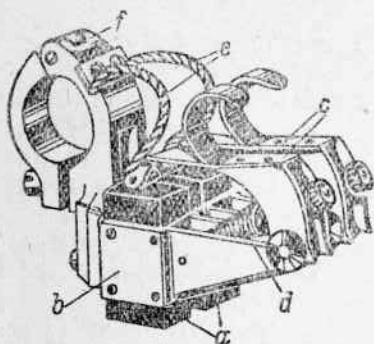


Рис. 32.

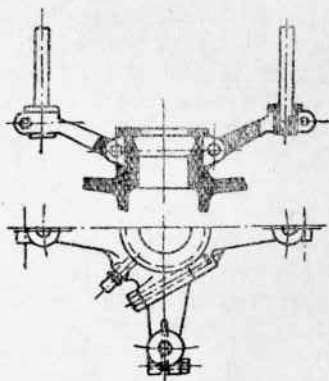


Рис. 33.

во внешнюю цепь. Конструкция каждой траверзы должна предусматривать возможность поворота щеток на некоторый, хотя бы небольшой угол, чтобы можно было расположить щетки на коллекторе в наивыгоднейшей с точки зрения коммутации зоне.

Магнитный поток вступает во вращающуюся часть машины (якорь) через воздушный промежуток, называемый между-

¹⁾ На рисунке показана машина, собранная на заводе для испытаний.

железным пространством, и замыкается затем при посредстве железа полюсных наконечников, сердечников полюсов и ярма.

Ярмо в машинах малой и средней мощности изготавливается обычно из чугуна, в машинах большой мощности — из литой стали. В последнем случае ярмо делают разъемным, располагая полюса так, чтобы можно было снимать всю верхнюю половину ярма с полюсами и их катушками (рис. 34).

Сердечники полюсов изготавливаются из литой стали, или из листового железа. Обычно литым сердечникам стремятся придать круглую форму для уменьшения длины проводника обмотки возбуждения, сидящей на полюсном сердечнике. Сердечнику, собранному из отдельных листов железа, придать

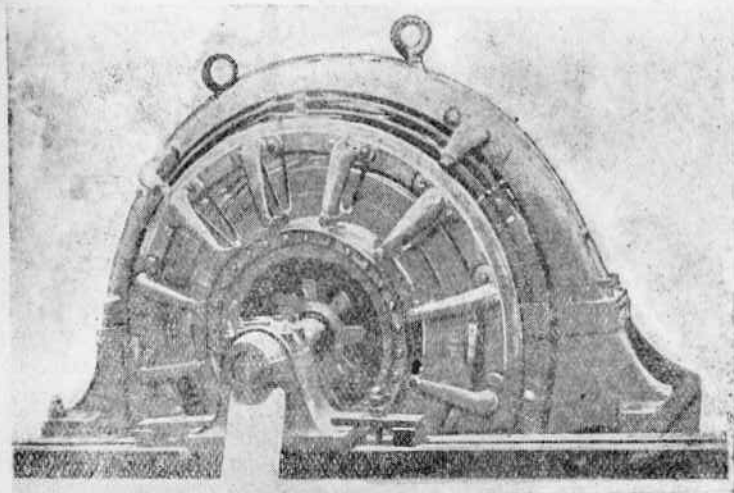


Рис. 34.

круглую форму не представляется возможным; поэтому такой сердечник применяют чаще в больших машинах, где необходимо обеспечить полную однородность сердечника и есть опасность появления раковин в отливке, ввиду значительной ее величины.

Для придания потоку, вступающему в ярмо из полюсов, определенного распределения в пространстве, полюсные сердечники снабжаются так называемыми полюсными наконечниками. Наконечники эти изготавливаются из листового железа, чтобы увеличить электрическое сопротивление их и уменьшить токи Фуко, появляющиеся в сердечнике вследствие пульсаций магнитного потока, обусловленных зубчатым строением якоря. На рис. 35, а дан разрез полюса с наконечником и катушкой возбуждения. Здесь полюс и наконечник выполнены из листового железа и представляют одно целое. Катушка возбуждения удерживается на полюсах высту-

пами наконечника; проводники этой катушки наложены на особый каркас, изготовленный из латуни или изолирующего материала. Полюс крепится к ярму обычно помощью болта.

Кроме главных полюсов, служащих для создания основного магнитного потока в машине, в настоящее время подавляющее большинство машин постоянного тока снабжается дополнительными полюсами, располагаемыми между главными. Назначение дополнительных полюсов состоит в том, чтобы создать магнитный поток, облегчающий условия коммутации тока в проводниках якоря. Включаются катушки добавочных полюсов последовательно с якорем машины. На рис. 35, б показан общий вид дополнительного полюса с его обмоткой.

Последовательное включение выполняется и для компенсационной обмотки, предназначенной для уничтожения вредного поля, созда-

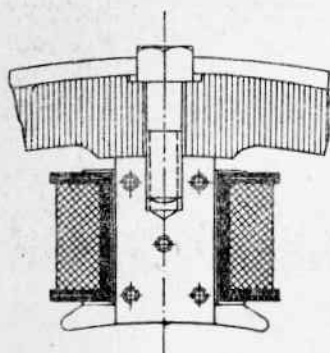


Рис. 35, а.

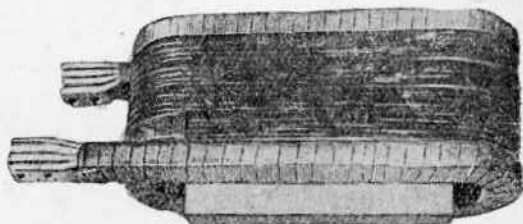


Рис. 35, б.

ваемого якорем при обтекании его током. Компенсационная обмотка укладывается во впадины, сделанные в полюсных наконечниках. На рис. 36, а и 36, б дан вид ярма машины с полюсами главными и дополнительными, а также компенсационной обмоткой в стадии ее изготовления на заводе „Электросила“.

Конструкция электрической машины не ограничивается частями, необходимыми непосредственно для проведения тока (обмотка якоря, коллектор щетки) или магнитного потока (полюсы, ярмо, сердечник якоря), но содержит также части, необходимые для выполнения якоря, как вращающегося тела, т. е. вал и подшипники. На рис. 37 даны валы двух машин, расположенные на двух подшипниках (как это чаще всего и бывает). Свободный конец вала (а) соединяется при помощи шкива, муфты и т. д. с механическим двигателем (в случае генератора) или с приводимым во вращение механизмом (в случае электродвигателя). Подшипники электрической машины крепятся в малых машинах непосредственно к ярму помощью подшипниковых щитов (рис. 38, а). В больших машинах подшипники устанавливают на особую плиту, к которой крепят и ярмо (рис. 38, б).

Конструкция машины с точки зрения внешнего оформления бывает весьма различна и зависит как от способов защиты ее

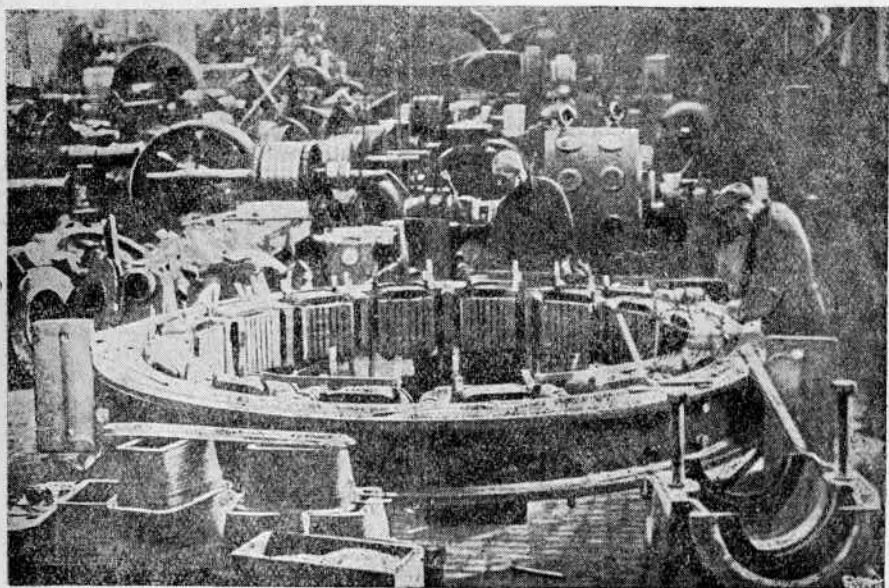


Рис. 36, а.

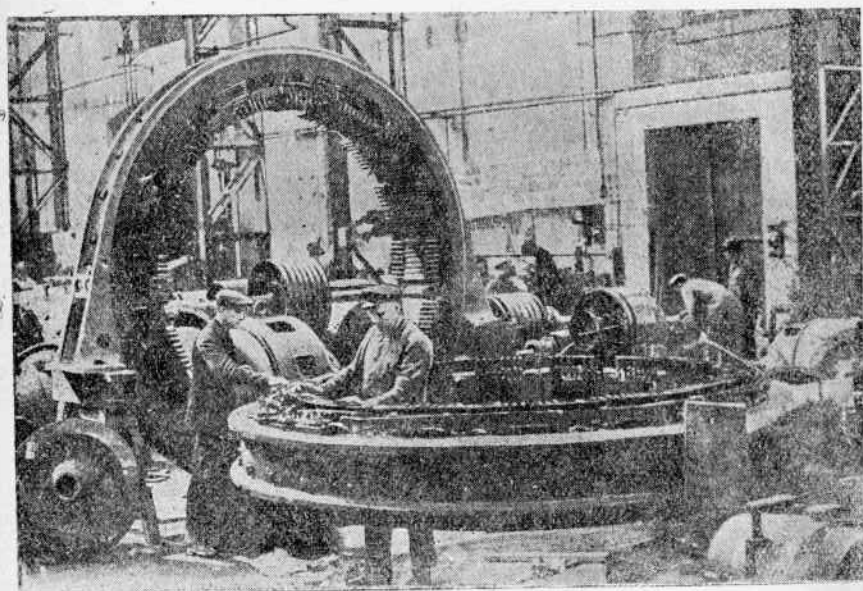


Рис. 36, б.

от всякого рода внешних влияний, так и от способа охлаждения. Различают машины открытого, защищенного и закрытого типов. Открытый тип применяется, главным образом, для генераторов и для двигателей в тех случаях, когда нет оснований опасаться повреждений отдельных частей от проникновения в машину посторонних тел (пыли, грязи, дождя, капель или брызг воды). Машины открытого типа не имеют специальных приспособлений для защиты вращающихся и токоведущих частей.

Защищенные машины имеют приспособления для защиты вращающихся частей от случайного прикосновения или попадания внутрь машины посторонних тел. Защита выполняется при этом таким образом, чтобы свободный обмен между машиной и наружной средой не был нарушен.

Этот же тип защищенных машин может иметь приспособления, препятствующие проникновению в машину дождя и грязи

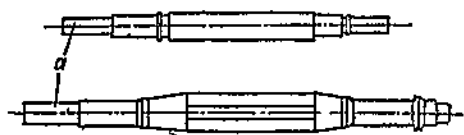


Рис. 37.

сверху. В этом случае машина называется защищенной от капежа. Последний тип защиты встречается чаще других. Так, например, серия машин постоянного тока ПН союзных заводов предполагает в своем нор-

мальном исполнении именно такой способ защиты (см. рис. 18).

Переходом к следующему типу, а именно к закрытым машинам, является конструкция, предусматривающая защиту машины от водяных капель и струй любого направления.

Закрытые машины, не будучи совершенно герметичными, могут быть выполнены как с наружным обдуванием помощью вентилятора, так и без такового. В последнем случае машина обычно снабжается внутренним вентилятором для внутренней циркуляции воздуха. В некоторых случаях вентиляция закрытых машин производится путем подвода охлаждающей среды во внутрь машины помощью труб.

Закрытые машины могут быть выполнены и герметическими с усиленным уплотнением, препятствующим проникновению влаги внутрь машины при полном погружении ее в воду в течение 4 часов (согласно нормам).

Машины с защитой против взрыва снабжены особым кожухом, который препятствует передаче пламени воспламеняющемуся газу вне машины и наоборот.

Такие машины применяются, например, на нефтеналивных судах.

На конструктивном выполнении машины, помимо защиты, указывается также способ охлаждения.

Машиной с естественным охлаждением называется такая машина, которая не имеет никаких специальных приспособлений для охлаждения.

Машина с самовентиляцией имеет вентилятор или какое-либо специальное приспособление, составляющее одно

целое с вращающейся частью машины. Машина с наружной самовентиляцией имеет внешнюю поверхность, охлаждаемую помощью пристроенного и приводимого во вращение самой машиной вентилятора.

Машина с посторонним охлаждением имеет подачу охлаждающей среды (газообразной или жидкой) специаль-

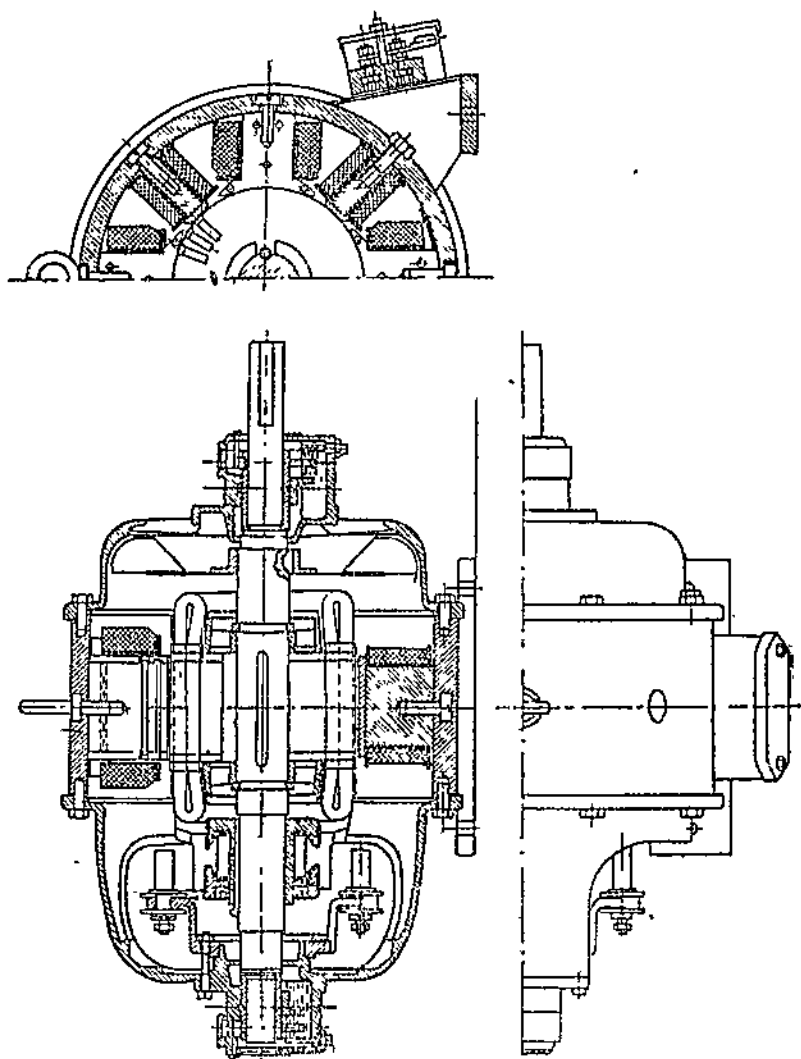


Рис. 38, а.

ным приспособлением (вентилятором или насосом), находящимся вне машины.

В этом случае можно иметь три категории охлаждения: а) машина с воздушным охлаждением, б) машина с замкнутой циркуляцией газа (воздуха или водорода), в) машина с водяным охлаждением.

ОБОТКИ ЯКОРЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА.

1. Принцип выполнения барабанной обмотки.

Элементарной частью обмотки барабанного якоря является секция. Под секцией понимают основной элемент обмотки,

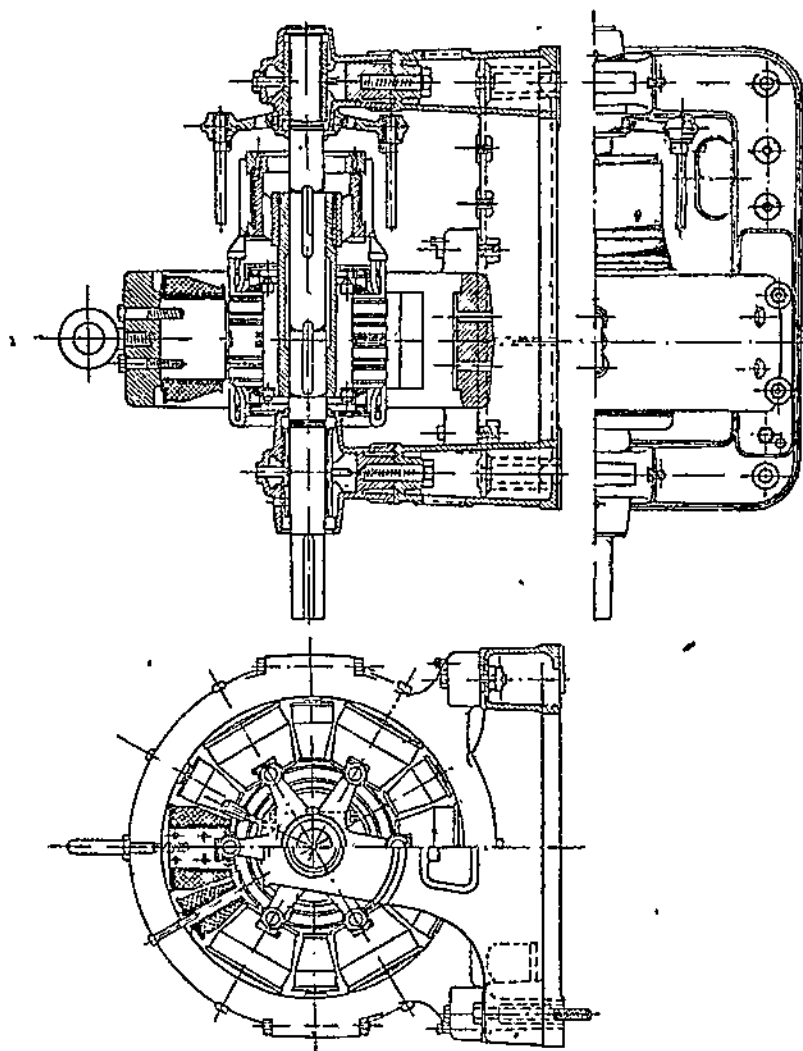


Рис. 38, а, б.

имеющий два самостоятельных присоединения к коллектору, следующие один за другим по схеме обмотки. Секция имеет две активные стороны, располагаемые одна наверху, а другая внизу пазов якоря, и лобовые части, служащие для

соединения активных сторон между собой и для присоединения секции к коллектору.

На якоре машин должен быть уложен ряд секций. Число их фиксируется обычно необходимым числом коллекторных пластин, в целях получения возможно малых пульсаций э. д. с., достижения необходимой ее величины.

В тех же целях получения возможно меньших пульсаций э. д. с. активные стороны должны быть равномерно распределены по пазам якоря. Это необходимо также для того, чтобы внутри замкнутой обмотки не было вредных уравнительных токов.

На рис. 39 изображена барабанная замкнутая обмотка при числе секций $S=K=6$.

На примере подобной обмотки выясним особенности замкнутой обмотки и установим порядок соединения отдельных секций между собой. В основу нашего рассмотрения положим принцип наибольшей экономии активного материала (меди), возможно меньших потерь энергии, наибольшего значения э. д. с. и наибольшей простоты изготовления машины.

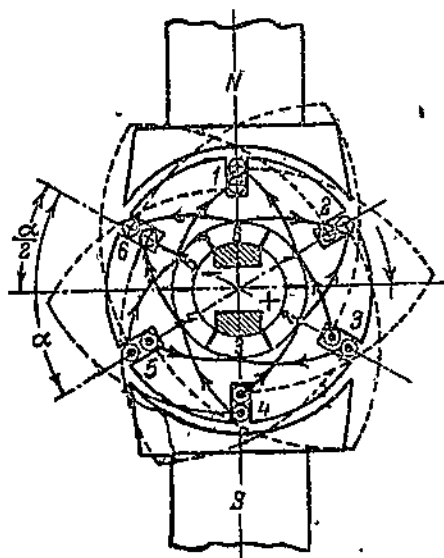


Рис. 39.

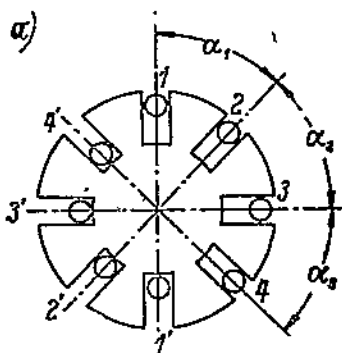


Рис. 40, а.

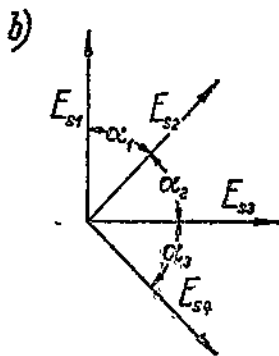


Рис. 40, б.

Предположим, что э. д. с. каждой секции, имея амплитуду E_s , меняется синусоидально при вращении секции совместно с якорем. Такое предположение означает, что магнитное поле принято распределенным синусоидально по окружности якоря.

Тогда э. д. с. отдельных секций можно представить сдвинутыми во времени на углы $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ (рис. 40). При этом можно при-
нять, что:

$$E_{S1} = E_{S2} = E_{S3} = \dots = E_{Sn},$$

так как все секции находятся в одном и том же поле.

При замыкании всех секций в одну общую цепь в контуре обмотки получится геометрическая сумма э. д. с. отдельных секций, и для того, чтобы в обмотке не было внутреннего тока и связанных с его циркуляцией потерь, необходимо, чтобы ата
сумма

$$\sum_{n=1}^{n=n} E'_{Sn} = 0.$$

Последнее может иметь место лишь в том случае, если э. д. с. составляют замкнутый многоугольник и притом правильный вследствие равенства всех э. д. с.; другими словами, все э. д. с. должны быть сдвинуты на равные углы. Отсюда очевидно равенство:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \dots = \alpha_n.$$

т. е. секции должны быть равномерно распределены на поверхности якоря.

Рассмотрим теперь соединение отдельных секций между собой. При этом имеются в виду, во-первых, возможная экономия меди на лобовые части обмотки, вследствие чего необходимо соединять секции возможно близкие друг к другу, а во-вторых, экономия труда при выполнении обмотки, вследствие чего соединения должны производиться в определенном порядке. Эти соединения должны быть, кроме того, равномерно распределены по лобовым частям якоря в целях лучшего охлаждения и лучшей балансировки якоря.

Указанными обстоятельствами обуславливается следующий порядок соединения секций (рис. 39). Выйдя из коллекторной пластины № 1, проходим секцию № 1 и возвращаемся вновь к коллектору (пластине № 2), после чего переходим к началу следующей секции, ближайшей к исходной, т. е. к секции № 2. Пройдя эту секцию, присоединяемся опять к коллектору. Продолжая таким образом обход всех секций, замкнем, в конце концов, обмотку, вернувшись к исходной пластине № 1. Следует отметить, что вместо присоединения конца первой секции ко второй можно было бы с таким же успехом присоединиться к началу секции № 3, лежащей с противоположной стороны секции № 1 (рис. 41); однако в этом случае получилась бы большая длина лобовых частей и их перекрещивание, что неудобно по производственным соображениям. Условимся поэтому в дальнейшем, после обхода одной секции, всегда присоединяться к пластине, лежащей в направлении нумерации секционных сторон и пластин коллектора, ведя нумерацию пластин и сторон всегда в одном и том же направлении.

Отметим, что выполнение обмотки двухполюсной машины возможно также согласно рис. 42, где соединения между секционными сторонами и присоединения секции к коллектору лежат по разным сторонам плоскости витка, проведенной через якорную ось, тогда как в обмотках рис. 41 и 39 эти соединения лежат по одной стороне от этой плоскости. Ввиду большей простоты изготовления и ремонта обмотки, согласно рис. 39, только этот тип обмотки и находит себе применение в двухполюсных машинах.

Пользуясь приведенными схемами обмотки, рассмотрим теперь, каково должно быть положение щеток на коллекторе по отношению к неподвижной системе полюсов машины, а также как распределяется ток внутри обмотки.

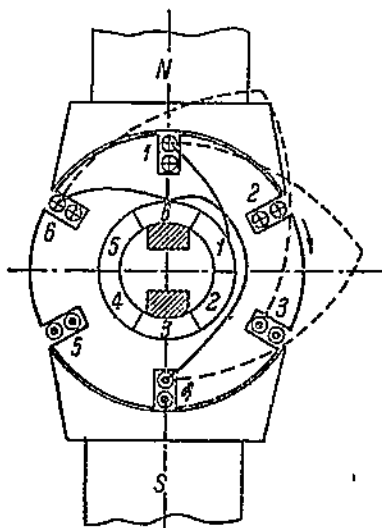


Рис. 41.

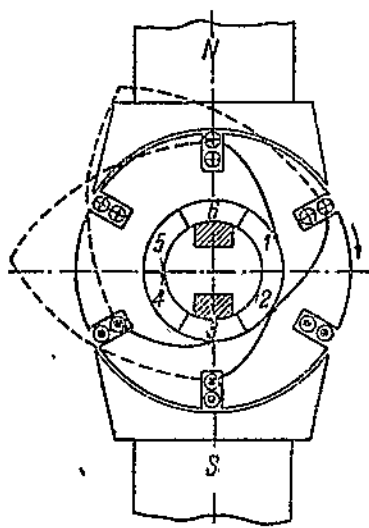


Рис. 42.

Как было установлено выше, результирующая э. д. с., индуцированная в симметричной обмотке, равна нулю. Это, однако, не значит, что по отношению к внешней цепи э. д. с. машины также равна нулю. Наоборот, необходимо выбрать такое положение щеток на коллекторе, чтобы обеспечить между ними наибольшую э. д. с. Естественно, что для этого необходимо иметь между щетками секционные стороны с одинаковым направлением э. д. с., в них индуцированных. Располагая щетки так, как показано на рис. 39, т. е. под серединой полюсов, получим, при заданном направлении вращения якоря машины по часовой стрелке, направление э. д. с., указанное на рис. 39.

Выйдя из верхней щетки, соединенной при данном положении якоря с пластиной № 6, можем двигаться в двух направлениях по схеме обмотки — к секции № 3 или № 5. Двигаясь как в том, так и в другом направлении, придем в конце концов к пластине № 3

с той разницей, что при одном направлении обхода пройдем секции №№ 6, 1, 2, а при другом — №№ 5, 4, 3. Как видно, при каждом обходе имеем суммирование э. д. с. отдельных секций, вследствие чего между щетками будет действовать э. д. с., равная сумме э. д. с. отдельных, проходимых при таком обходе секций.

Так как э. д. с. всех секций составляют замкнутый многоугольник, то нанесем его на рис. 43. Очевидно, что результирующая э. д. с., равная, при отсутствии тока нагрузки, приложенному к щеткам напряжению, будет равна геометрической сумме э. д. с. отдельных секций, лежащих по пути от щетки до щетки. Таким образом на рис. 43, а получаем E_r' как результирующую электродвижущих сил E_{s1} , E_{s2} и E_{s3} , с одной стороны, и электродвижущих сил E_{s3} , E_{s4} и E_{s5} — с другой.

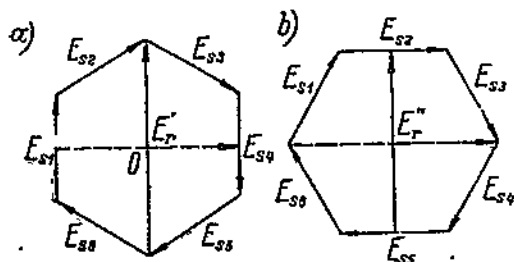


Рис. 43.

Выясним теперь, как будет меняться электродвижущая сила E_r при вращении машины. Очевидно, что многоугольник э. д. с. (так называемый потенциальный многоугольник) не будет оставаться в этом случае неподвижным, но будет вращаться вокруг своего центра O со скоростью,

равной (для двухполюсной машины) скорости вращения якоря. Положим, что якорь переместится на половину расстояния между двумя впадинами. Тогда получим диаграмму э. д. с. согласно рис. 43, б.

Результирующая э. д. с. будет теперь иметь значение E_r'' , меньшее предыдущего. Вслед за поворотом якоря еще на половину расстояния между двумя впадинами получим снова увеличение э. д. с. между щетками до величины E_r' .¹⁾

Таким образом оказывается, что э. д. с. машины пульсирует между значениями ее E_r' и E_r'' , причем мгновенные значения э. д. с. на щетках будут равны максимальным значениям E_r' и E_r'' , так как линия времени будет совпадать с вертикальной осью рис. 43, а и б. В последнем легко убедиться, приняв за ориентир направление э. д. с. E_{s1} ; эта э. д. с. имеет в положении якоря, соответствующем рис. 39, очевидно, наибольшее значение, так как секция 1 находится в наиболее густом поле. Очевидно, что на диаграмме рис. 43, а мгновенное значение э. д. с. этой секции для указанного момента равно ее амплитудному значению:

$$e_{s1} = E_{s1},$$

т. е. э. д. с. должна проектироваться на линию времени без

¹⁾ В этом легко убедиться, построив диаграмму, подобную рис. 43, а.

искажения. Отсюда очевидно, что линия времени направлена вертикально. Так получится при положении щеток согласно рис. 39. Если же переместить щетки в другое крайнее положение, расположив их по горизонтальной оси, то легко видеть, что результирующая э. д. с. машины будет равна нулю, так как проекция на линию времени результирующей э. д. с. вследствие ее горизонтального положения (рис. 43, пунктир) окажется равной нулю.

В промежуточном положении щеток получим значение э. д. с. меньшее, чем для положения их согласно рис. 39. Следовательно для получения наибольшей возможной электродвижущей силы необходимо ставить щетки в соответствующее положение; это положение щеток определяется коллекторными пластинами, в которых происходит встреча э. д. с. (см. стрелки на лобовых соединениях, рис. 39).

Вопрос о распределении тока внутри обмотки машины непосредственно вытекает из основных положений, затронутых нами в вопросе о суммировании э. д. с. отдельных секций.

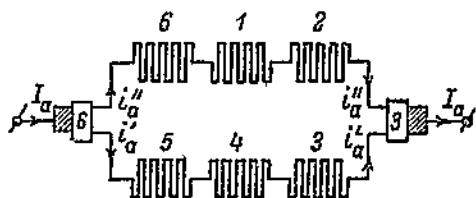


Рис. 44.

В самом деле, идя от щетки до щетки в схеме замкнутой обмотки, мы имеем два пути, причем суммарные э. д. с. секций, встречающихся как на том, так и на другом пути, всегда оказывались равными вследствие симметрии обмотки. Очевидно, что под действием результирующей э. д. с. машины, равной порознь каждой из э. д. с. двух пройденных нами ветвей обмотки, ток и пойдет во внешний контур, включаемый между щетками, наложенными на коллектор. Этот ток внутри машины разветвится на две части, которые пройдут по рассмотренным двум ветвям, называемым параллельными ветвями обмотки якоря. Таким образом в случае двухполюсной машины имеем две параллельные ветви. Сечение меди обмотки якоря должно быть рассчитано здесь на половину силы тока, отдаваемого машиной во внешнюю цепь. Рассматривая отдельные секции обмотки машины как некоторые сопротивления, получим соединение сопротивлений, эквивалентное обмотке якоря машины рис. 39. На рис. 44 показано распределение тока, причем номера сопротивлений соответствуют номерам секций. Полный ток якоря обозначен здесь через I_a , токи внутри обмотки — через i'_a и i''_a . При достаточно большом числе секций можно считать в данном случае:

$$i'_a = i''_a = \frac{I_a}{2}.$$

2. Простые параллельные обмотки якоря и их основные свойства.

Рассмотренная нами выше основная схема замкнутой барабанной обмотки двухполюсной машины носит название п а р а л-

лельной или петлевой обмотки. Первое название не характерно для обмотки двухполюсной машины и имеет смысл лишь в применении к многополюсной; второе название произошло потому, что, разрезая якорь по его образующей и разворачивая цилиндрическую поверхность его

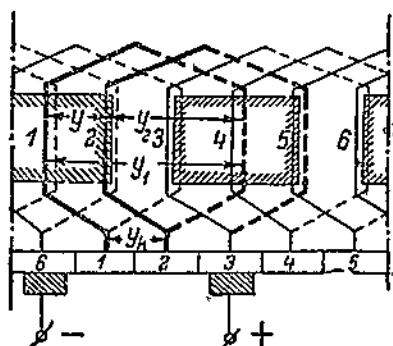


Рис. 45.

вместе с обмоткой в плоскость, получим характерные петли обмотки. На рис. 45 дана развернутая схема обмотки рис. 39. Характерная петля, которую делает обмотка при переходе от одной секции к следующей, выделена для секций №№ 1 и 2 жирной линией. Соединение секционных сторон идет здесь также с задней стороны цилиндра якоря, но соединяются между собой стороны, лежащие не по диаметру, а значительно ближе. Объясняется это тем, что при наличии четырех полюсов и чередовании их полярности изменение знака э. д. с. происходит при сдвиге на $\frac{1}{4}$ окружности якоря. Поэтому в электрическом отношении диаметрально проводники (сдвинутые на 180° электрических) оказываются сдвинутыми лишь на 90° пространственных. Схема обмотки в остальных отношениях остается той же, что и для двухполюсной машины.

Отметим, что и при многополюсной машине не обязательно положение сторон секции в одинаковых магнитных условиях (сдвиг точно на 180° электрических). Возможно и некоторое укорочение секции, как то показано на рис. 48. Число щеток в многополюсной машине обычно равно числу полюсов, и расположение их в местах раздела э. д. с. такое же, как и

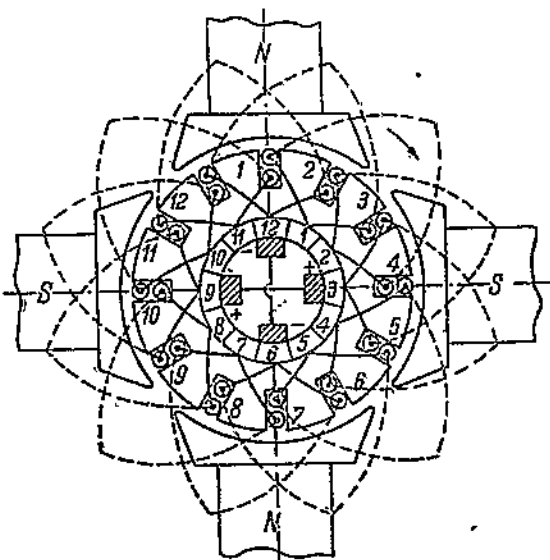


Рис. 46.

в двухполюсной машине. Полярности щеток при этом чередуются. При $2p$ полюсах и петлевой обмотке имеем всегда $2p$ щеток. Число параллельных ветвей ($2a$), на которые разбивается обмотка якоря в петлевой обмотке, также равно числу полюсов:

$$2a = 2p, \quad (1)$$

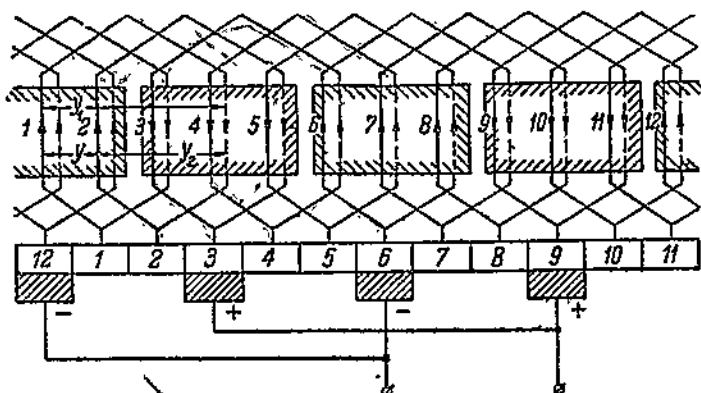


Рис. 47.

так как ток меняет направление после прохождения по схеме обмотки под одним полюсом. Таким образом, увеличивая число полюсов, можно увеличить число параллельных ветвей, а следовательно, и силу тока, отдаваемую машиной во внешнюю сеть (так как сечение одной ветви ограничено производственными и коммутационными соображениями). Ввиду того, что машина с параллельной обмоткой представляет собой как бы $p = a$ параллельно соединенных двухполюсных машин, обмотка такого типа получила название параллельной.

Изображая, как и ранее, параллельные ветви якоря в виде ряда последовательно соединенных сопротивлений, входящих в каждую ветвь, получим рис. 49, соответствующий схеме обмотки рис. 47. Как видно из рисунка, в данном случае полу-

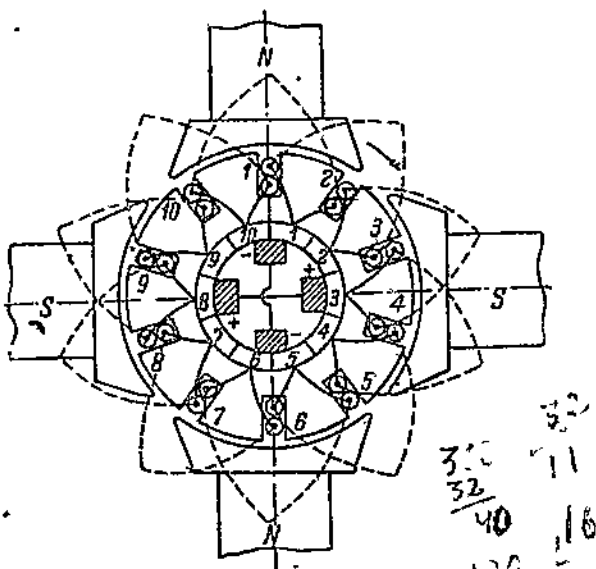


Рис. 48.

чаются четыре параллельные ветви по числу полюсов. Щетки одинаковой полярности соединены между собой параллельно и отводят ток во внешнюю цепь.

Установим теперь некоторые количественные соотношения и формулы, характеризующие параллельную обмотку, и, прежде всего, введем понятие о шаге обмотки.

Проходя последовательно по схеме обмотки от одной активной стороны к следующей, мы сдвигаемся на одну секцию обмотки, после чего переходим к следующей секции и т. д. Сдвиг по схеме обмотки между началом одной секции и началом следующей за ней, выраженный числом секций, лежащих на якоре между указанными началами, носит название шага по секциям или секционного шага и обозначается через y . Для параллельной обмотки

$$y = 1, \quad (2)$$

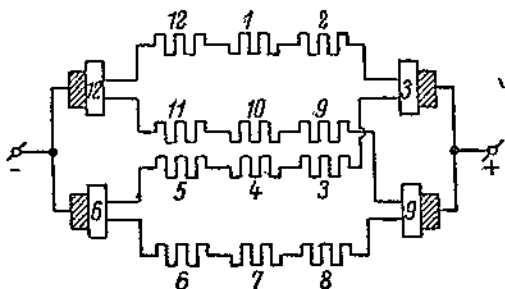


Рис. 49.

так как при сдвиге по схеме обмотки на одну секцию мы присоединяемся к секции, лежащей рядом с исходной.

Шаг обмотки может быть выражен не только числом секций, лежащих на якоре между двумя секциями, проходимыми по схеме обмотки, но и числом коллекторных делений,

на которое приходится смещаться при переходе от одной секции к следующей по схеме обмотки. Получается так называемый шаг по коллектору. Так как у данной обмотки начало одной секции и конец ее (начало следующей секции) присоединяются к двум соседним коллекторным пластинам, то шаг по коллектору:

$$y_k = 1. \quad (2a)$$

Кроме результирующего шага (y), различают частичные шаги.

Первым частичным шагом называют сдвиг между начальной и конечной сторонами одной и той же секции, вторым частичным шагом — сдвиг между конечной стороной какой-либо секции и начальной стороной секции, следующей за данной по схеме обмотки.

Первый частичный шаг (y_1) выражается числом секций, на которое приходится смещаться по окружности якоря при переходе от начальной активной стороны данной секции до конечной ее стороны. Так, для обмотки рис. 46 имеем $y_1 = 3$, а для обмотки рис. 48 — $y_1 = 2$.

1) Коллекторным делением называется расстояние, образуемое пластиной коллектора и изоляционной прослойкой.

Второй частичный шаг (y_2) выражается числом секций от конечной активной стороны данной секции до начальной стороны следующей секции. На рис. 47 получим $y_2 = 2$, а на рис. 48 — $y_2 = 1$.

Очевидно:

$$y_1 - y_2 = y, \quad (3)$$

т. е. разность шагов равняется результирующему шагу. Для обмоток рис. 46 и рис. 48 имеем:

$$y = 1,$$

как того и следовало ожидать на основании ф-лы (2).

Частичные шаги легко могут быть рассчитаны для любой обмотки, если известно общее число секций S . Расстояние между начальной и конечной сторонами одной секции, т. е. шаг y_1 , будет:

$$y_1 \cong \frac{S}{2p}, \quad (4)$$

что необходимо для получения возможно большей э. д. с., индуктированной в секции.

Последнее равенство можно переписать так:

$$y_1 = \frac{S}{2p} (+) \varepsilon, \quad (5)$$

где ε — некоторое, возможно малое, число, которое делает шаг y_1 целым. Для экономии меди на лобовые соединения берут обычно перед ε знак минус, т. е. укорачивают, а не удлиняют шаг.

Если S делится на $2p$ без остатка, то ε можно принять равным нулю. В этом случае получается обмотка с так называемым диаметральной шаг.

В некоторых случаях, в особенности в машинах старого типа, выполненных без дополнительных полюсов, принимают $\varepsilon \neq 0$ даже при условии, что $\frac{S}{2p}$ равно целому числу. Тогда ε должно быть также целым числом. Оно выражает при этом число секций, на которое производится укорочение. Обычно в таких случаях $\varepsilon = 1$.

Что касается до шага y_2 , то он определяется величиной шагов y_1 и результирующего y .

Имеем:

$$y_2 = y_1 - (+) y. \quad (6)$$

На рис. 47 обозначены все три шага петлевой обмотки.

Отметим, что шаг y может иметь как положительное, так и отрицательное значение. Для всех предыдущих обмоток, кроме изображенной на рис. 41, необходимо принимать положительное значение y . Как было указано выше, при соединении секций по схеме рис. 41 получается перекрещивание концов идущих к коллектору, что неудобно по производственным соображениям.

Поэтому отрицательное значение y возможно, но дает практически неудобную обмотку.

На рис. 50, а, 50, б и 50, в даны для сравнения еще три развернутые схемы петлевых обмоток с обозначением всех шагов.

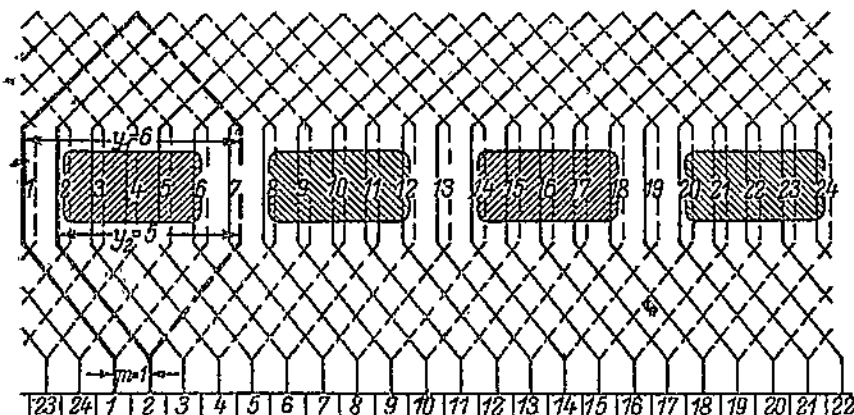


Рис. 50, а. Простая правая петлевая обмотка с диаметральной шагом.

$$S = K = 24; \quad p = 2; \quad y = \pm m = +1;$$

$$y_1 = \frac{S}{2p} \pm \epsilon = \frac{24}{2 \cdot 2} + 0 = 6;$$

$$y_2 = 6 - 1 = 5.$$

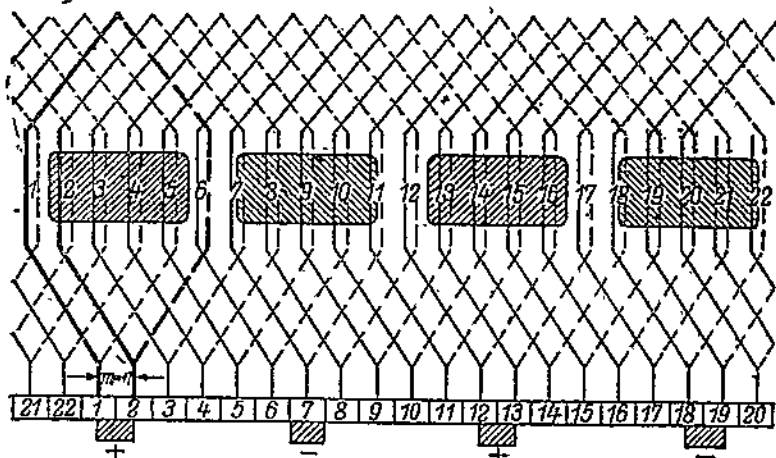


Рис. 50, б. Простая правая петлевая обмотка с сокращенным шагом.

$$S = K = 22; \quad p = 2; \quad y = \pm m = +1;$$

$$y_1 = \frac{S}{2p} \pm \epsilon = \frac{22}{2 \cdot 2} - \frac{1}{2} = 5; \quad \epsilon = -\frac{1}{2}.$$

Рис. 50, а дает правую петлевую обмотку с диаметральной шагом. Наименование правой эта обмотка получила потому, что,

сдвигаясь от первой секции по схеме ее, мы идем вправо. На рис. 50, *б* дана обмотка с сокращенным шагом (так называемая хордовая). На рис. 50, *с* дана левая параллельная обмотка, где, выйдя из первой секции, приходится сменяться влево по схеме обмотки. В этом случае получается перекрещивание концов секции, идущих к коллектору.

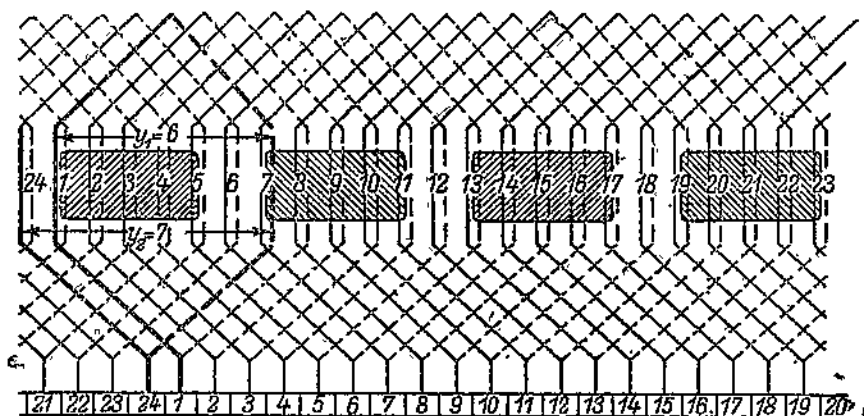


Рис. 50, *с*. Простая левая петлевая обмотка с диаметральной шагом.

$$S = K = 24; \quad p = 2; \quad y = \pm m = -1;$$

$$y_1 = \frac{S}{2p} \pm 1 = \frac{24}{2 \cdot 2} \pm 0 = 6; \quad y_2 = 6 + 1 = 7.$$

Расчет шагов обмотки по ф-лам (5) и (6) может быть применен к любому барабанному зубчатому якорю, хотя мы рассматривали до сих пор только такой якорь, во впадины которого уложены лишь две секционные стороны (согласно рис. 51, *а*).

Практически, в случае большого числа активных сторон, а также для придания зубцам якоря достаточной прочности,



Рис. 51, *а*.

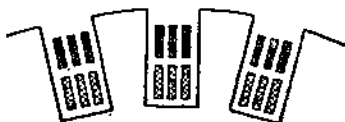


Рис. 51, *б*.

укладывают во впадину несколько сторон секций, как бы объединяя рядом лежащие впадины, содержащие каждая по две стороны. Получается большая впадина с секционными сторонами, уложенными в два ряда. На рис. 51, *б* имеем объединение трех малых впадин в одну большую.

Развернутая схема обмотки якоря при числе секционных сторон больше двух может быть изображена в упрощенном виде согласно рис. 52, *а*, где все четыре стороны, уложенные в одну

впадину, показаны одной линией. Такое изображение можно, конечно, применить и при двух сторонах во впадине, как показано на рис. 52, б. Обе обмотки могут быть, однако, изображены

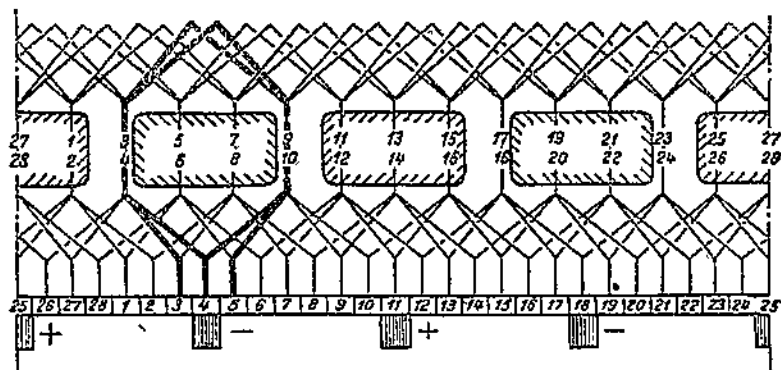


Рис. 52, а.

и так, как это было сделано ранее (рис. 47), причем в случае четырех сторон во впадине, показав обмотку так, как будто в пазу лежат две стороны, необходимо лишь отметить, что в действительности каждые два паза объединены в один.

Перейдем теперь к формулам для шагов обмотки зубчатого якоря. Перейти от секционного шага к шагу по зубцам, по-

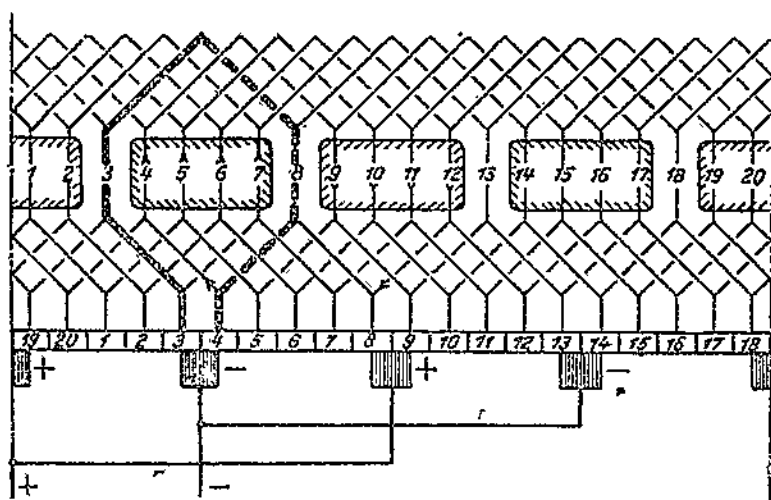


Рис. 52, б.

нимая под таким шагом число зубцов, заключающихся между сторонами каждой секции обмотки, весьма легко. В самом деле, секционный шаг всегда численно равен зубцовому в таком якоре, где число сторон во впадине (s_n) равно 2. Так, например, в обмотке рис. 47 между начальной и конечной сторонами секции

находятся три зубца (зубцовый шаг $y_z = 3$), и в то же время в этом промежутке расположены три секции ($y_1 = 3$). Отсюда очевидно, что в таком простейшем якоре секционный шаг может быть измерен числом зубцов. В случае же $s_n > 2$ зубцовый шаг будет равен:

$$y_z = \frac{y_1}{\frac{s_n}{2}}, \quad (7)$$

так как $\frac{s_n}{2}$ простейших впадин (содержащих две активные стороны) объединены теперь в одну.

Подставляя выражение для y_1 из ф-лы (5) в ф-лу (7), имеем:

$$y_z = \frac{2S}{2ps_n} (+) \frac{2e}{s_n}. \quad (8)$$

Так как

$$\frac{2S}{s_n} = Z,$$

где Z — число зубцов (впадин) машины, то:

$$y_z = \frac{Z}{2p} (+) \frac{2e}{s_n}. \quad (9)$$

При диаметральной шаге $e = 0$ получим:

$$y_z = \frac{Z}{2p}, \quad (9a)$$

как того и следовало ожидать.

Укорочение (удлинение) шага:

$$y_1 = \pm \frac{2e}{s_n}$$

не может быть здесь произвольным числом, а зависит при данном e от числа сторон во впадине s_n . Отметим, кроме того, что в противоположность y_1 зубцовый шаг y_z может и не быть целым числом.

Если y_z целое число, то все секции, лежащие одной своей стороной вверх какого-либо паза, лежат другой стороной вниз одного и того же паза, удаленного от первого на y_z зубцов. Все эти секции могут быть перед укладкой в пазы совместно изолированы, что облегчает намотку.

Обмотка с шагом y_z , равным целому числу, носит название равнотекционной (рис. 53, а), в отличие от ступенчатой обмотки (рис. 53, б), получающейся при y_z , не равном целому числу. В последнем случае зубцовый шаг выражается целым числом с дробью. Знаменатель этой дроби равен полному числу сторон секций в пазах, а числитель показывает, насколько данная добавочная сторона секции смещена по отношению к тому ее положению, которое она должна была бы занимать при равнотекционной

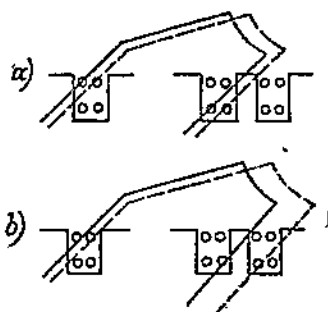


Рис. 53.

обмотке. Для обмотки рис. 54 шаг $y_z = 6\frac{1}{8}$, так как число зубцов между сторонами секции равно 6 и, кроме того, вторая сторона секции сдвинута на четыре интервала между секционными сторонами от того положения, которое она занимала бы нормально.¹⁾ Ступенчатые обмотки создают лучшие условия для

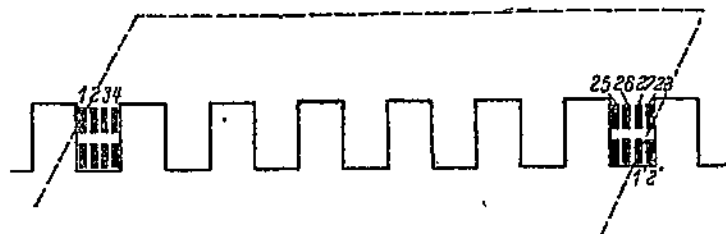


Рис. 54.

коммутирования и применяются в машинах при отсутствии дополнительных полюсов, а также в крупных машинах со стержневой обмоткой, где желательно принять все возможные меры для безискровой работы щеток.

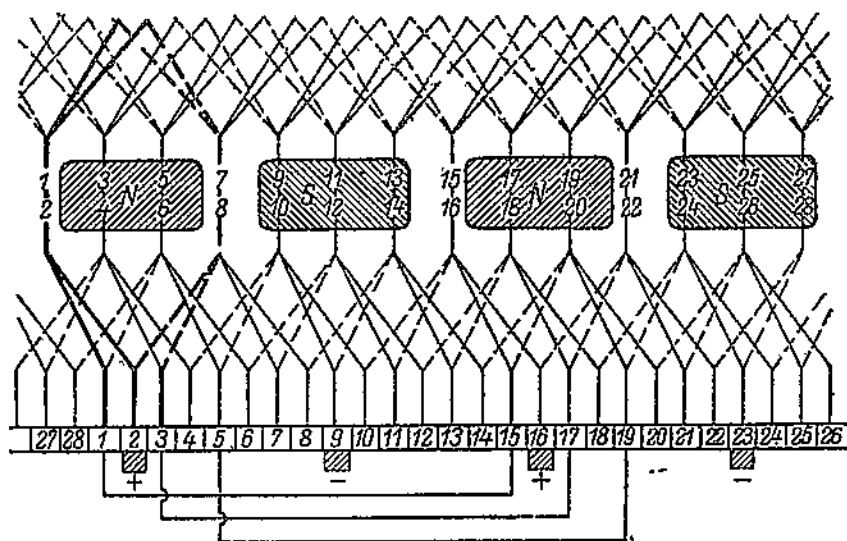


Рис. 55,а. Простая петлевая обмотка.

$$S = K = 28; \quad p = 2; \quad Z = 14;$$

$$y_z = \frac{y_1}{2} = 3; \quad y = \pm m = 1;$$

$$y_1 = \frac{S}{2p} - z = \frac{28}{2 \cdot 2} - 1 = 6.$$

¹⁾ В случае равноточечной обмотки она занимала бы положение, крайнее слева в той же впадине.

Зубцовым шагом и связью его с секционным шагом заканчиваем рассмотрение зубчатого якоря, так как второй частичный шаг, а также результирующий не нуждаются в выражении через зубцы. Все соединения, определяемые этими шагами, ведем, исходя из расчета шагов по секциям или, чаще, по коллектору. Первый же шаг было необходимо связать с зубцовым ввиду того, что при изготовлении отдельного элемента обмотки — секции неизбежно следует учитывать число зубцов и положение сторон секции в пазу.

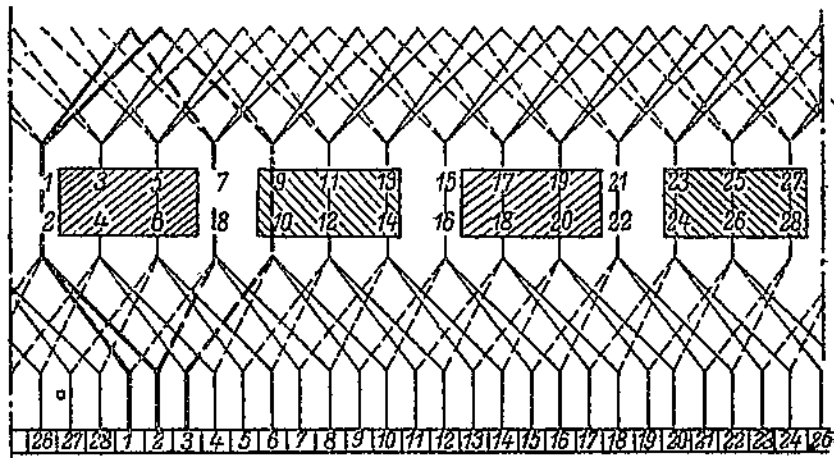


Рис. 55, б. Ступенчатая обмотка.

$$S = K = 28; \quad p = 2; \quad Z = 14;$$

$$y_z = \frac{y_1}{2} = 3\frac{1}{2}; \quad y = +1; \quad y_1 = \frac{28}{2 \cdot 2} - 0 = 7;$$

$$y_2 = 7 - 1 = 6.$$

В заключение на рис. 55, а и 55, б даны две схемы петлевых обмоток, из коих первая (рис. 55, а) равnoseкционная и вторая (рис. 55, б) — ступенчатая.

3. Множественно-параллельные обмотки.

В том случае, когда машина предназначена для генерирования тока низкого напряжения, но большой силы, как, например, это имеет место в генераторах, предназначенных для электролитических целей, представляется желательным распределить ток по возможно большему числу параллельных ветвей, чтобы входящие в каждую ветвь проводники имели приемлемое, с точки зрения их изготовления и укладки на якорь, сечение. В этом случае желательно иметь $2a > 2p$, чему не удовлетворяет, рассмотренная выше параллельная обмотка.

Путем совмещения на одном якоре нескольких одинаковых параллельных обмоток возможно увеличить число ветвей тока.

Для этого необходимо между проводниками одной, уложенной уже на якорь параллельной обмотки расположить проводники второй и замкнуть их в самостоятельную цепь. Между пластинами коллектора, присоединенными к первой обмотке, можно поместить еще такое же количество пластин и присоединить их ко второй обмотке. Можно пойти и далее в этом направлении, наложив на якорь третью, четвертую и т. д. обмотки и, соответственно, утроив, учетверив и т. д. число коллекторных пластин. На рис. 56 показана такая множественно-параллельная обмотка зубчатого якоря, состоящая из двух простых параллельных обмоток (коэффициент множественности $m=2$). Пластины, принадлежащие к различным обмоткам, показаны одни

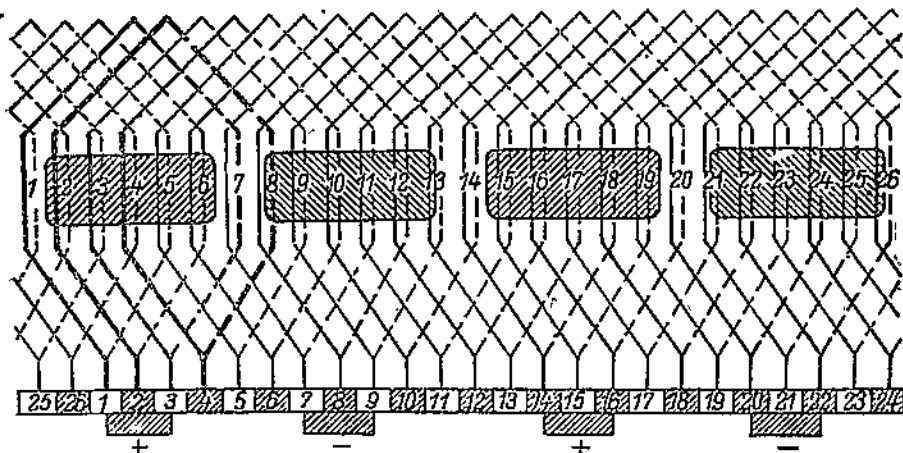


Рис. 56. Множественно-параллельная обмотка.

$$m=2; S=K=26; p=2;$$

$$u_1 = \frac{S}{2p} \pm e = \frac{26}{2 \cdot 2} - \frac{1}{2} = 6.$$

со штриховкой, другие без нее. Щетки, наложенные на коллектор, должны перекрывать каждая по две пластины, чтобы можно было снимать ток одновременно с обеих обмоток. Число параллельных цепей ввиду наличия m самостоятельных обмоток будет для множественно-параллельной обмотки:

$$2a = 2mp,$$

т. е. может быть увеличено в m раз.

Изменив число секций, лежащих на якоре, можно добиться того, чтобы при сохранении равенства:

$$a = mp$$

обмотка была замкнута только один раз. На рис. 57, а и 57, б даны две схемы множественно-параллельной обмотки, причем разница между ними заключается в том, что на рис. 57, б число

секций и коллекторных пластин на единицу меньше. Ввиду этого обмотка рис. 57, *б* замыкается всего один раз, оставаясь в то же время множественной обмоткой. Получается это оттого, что числа активных сторон каждой обмотки не равны между собой вследствие нечетного общего числа секций и коллек-

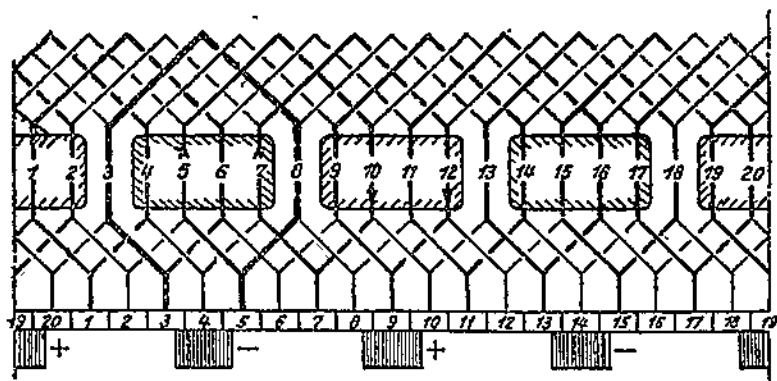


Рис. 57, *а*.

торных пластин. Для осуществления в этих условиях двух самостоятельных обмоток пришлось бы допустить асимметрию, вводя в одну из них 10 секций, а в другую 9, при неодинаковом в шаге месте замыкания. Значительно лучше замкнуть обмотку один раз, ведя соединение все время через одну секцию.

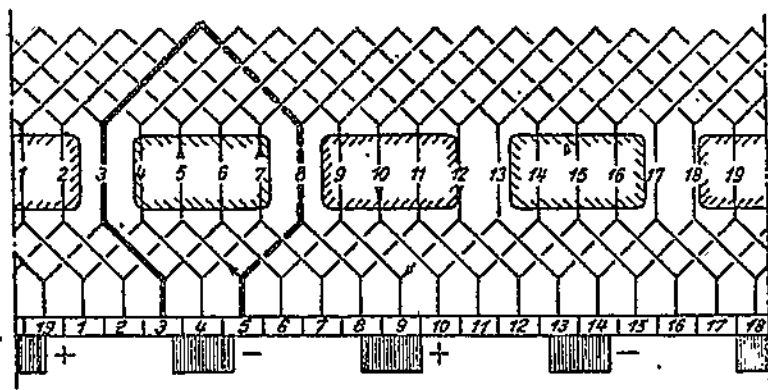


Рис. 57, *б*.

Несмотря на однократное замыкание обмотки рис. 57, *б*, число параллельных ветвей осталось в ней то же, что и в обмотке рис. 56, *а*, в чем легко убедиться, проследив разветвления тока. Поэтому множественно-параллельная обмотка может быть как многократно, так и однократно замкнутой.

Чтобы определить, сколько раз замыкается множественная обмотка (число замыканий обозначим через g), необходимо найти общий наибольший делитель числа коллекторных пластин и коллекторного шага. Делитель этот и будет определять число замыканий обмотки. Он лежит, вообще говоря, в пределах:

$$1 \leq g \leq m.$$

Так, например, согласно рис. 57, *a*, число коллекторных пластин $K=20$ и $y_k=2$, откуда:

$$m=g=2.$$

На рис. 57, *b* имеем:

$$K=19, \quad y_k=2,$$

т. е.

$$m=2, \quad g=1.$$

Обращаясь к количественным характеристикам множественной обмотки, имеем выражение для результирующего секционного шага:

$$y = m. \quad (10)$$

Шаг по коллектору:

$$y_k = m, \quad (10a)$$

так как для перехода от одной секции к следующей приходится пройти m секций и столько же коллекторных пластин.

Первый частичный шаг попрежнему равен:

$$y_1 = \frac{S}{2p} (\pm) e. \quad (11)$$

Второй частичный шаг:

$$y_2 = y_1 (\pm) m = \frac{S}{2p} (\pm) e (\pm) m. \quad (12)$$

Отметим, что практически применяют лишь обмотку с $m=2$ при $g=2$, исходя из необходимых условий симметрии (см. далее).

4. Простые последовательные обмотки.

В машине постоянного тока часто представляется желательным, при числе полюсов больше двух, иметь только две параллельные ветви в обмотке якоря при двух щеточных коллекторах. Необходимость в двух параллельных ветвях может встретиться в том случае, когда по условиям наивыгоднейшей величины тока в каждом проводнике обмотки желательно разделить полный ток машины лишь на две части. В некоторых случаях желательно иметь не более двух щеток и в многополюсной машине (когда необходимо сосредоточить их на небольшом дуге коллектора с целью облегчения осмотра).

Отличие такой обмотки от параллельной заключается в том, что в параллельной обмотке соединяют последовательно все секции, лежащие в сфере двух полюсов, и только после этого

переходят к следующим, между тем как в обмотке с двумя ветвями последовательно соединяют секции, обходя все полюсные группы столько раз, сколько имеется секций на пару полюсов. После обхода всех секций обмотка должна замкнуться. На рис. 58, а дан порядок соединения секций последовательной обмотки. В случае простой параллельной обмотки пришлось бы соединить начало и конец секции 1 с пластинами коллектора 1 и 2, а также с началом и концом соседних секций. Образуя последовательную обмотку, соединяем также начало секции 1 с коллекторной пластиной под тем же номером, но затем, до присоединения к пластине 2 (или 13), захватываем секцию 7, лежащую примерно в тех же магнитных условиях, что и секция 1, но в сфере действия другой пары полюсов, после чего возвращаемся к пластине 13. Вследствие этого, между пластинами 1 и 13 получаются две секции (при p парах полюсов — соответственно p секций), в. д. с. которых будут складываться. В дальнейшем продолжаем подобные же соеди-

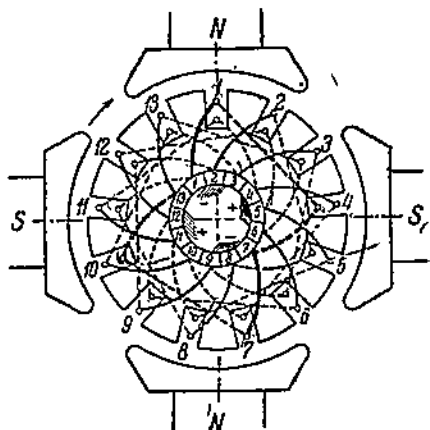


Рис. 58, а.

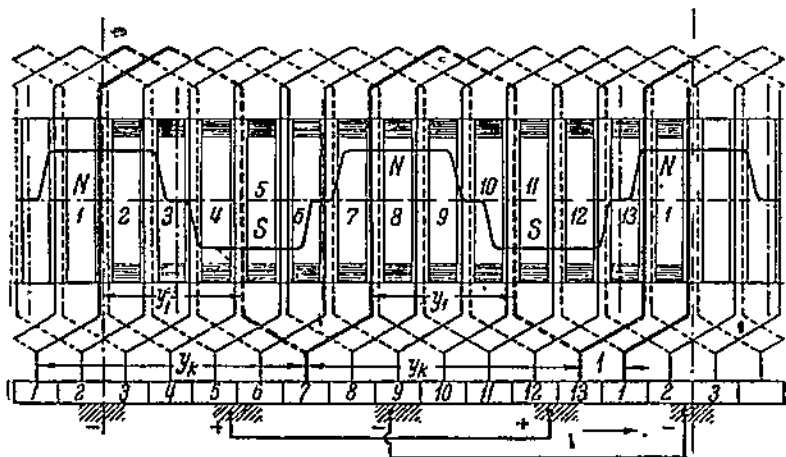


Рис. 58, б.

нения, двигаясь все время вперед по схеме обмотки. После шести обходов обмотка замыкается на себя.

В развернутой схеме обмотки (рис. 58, б) последовательно соединенные между собой секции получают характер волны,

следовательная обмотка при числе полюсов машины, равном шести. На коллекторе в соответствующих местах расположено шесть щеток. При данном положении якоря в четырех нейтральных зонах имеется по три секционных стороны, замкнутых накоротко щетками, и по четыре в двух зонах (см. зачерненные секционные стороны рис. 60, а). Несмотря, однако, на переход секции через нейтраль и замыкание ее накоротко щеткой, число параллельных ветвей обмотки остается равным двум. В этом легко убедиться, изобразив схематически параллельные цепи обмотки. На рис. 60, б дана такая схема. Здесь отдельные секции показаны в виде сопротивлений, обозначенных соответствующим номером. Секции 2, 3, 10, 17 и 18 оказываются зам-

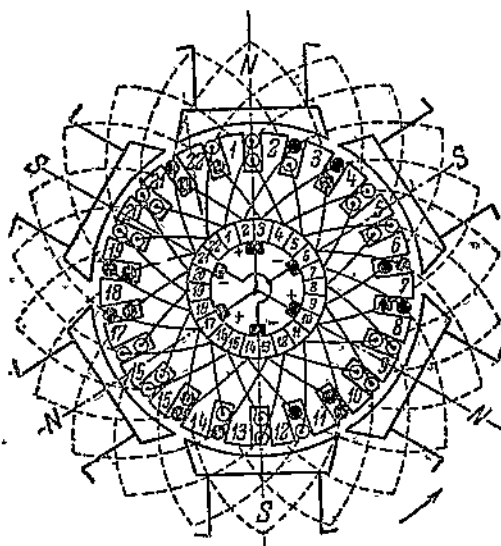


Рис. 60, а.

кнутыми накоротко положительными щетками, секции же 6, 7, 13, 14 и 21 — отрицательными щетками. В последовательной обмотке секция, переходя через нейтральную зону из сферы действия одной пары полюсов в сферу действия следующей, хотя и переключается в другую параллельную ветвь, но эта ветвь является той же, в какой секция была при проходе ее под предыдущей полюсной парой. Происходит это благодаря последовательному соединению по схеме обмотки всех секций, лежащих под одноименными полюсами.

Наличие двух параллельных ветвей в последовательной обмотке позволяет вместо полного комплекта щеток ограничиться только двумя при любом числе полюсов. Оставляя на схеме рис. 60, а любую пару щеток различной полярности, видим, что попрежнему в каждой нейтральной зоне, замкнутой щеткой накоротко, имеется хотя бы по одной секции. Эти сек-

ции находятся по три в последовательном соединении, но это дела не меняет, хотя и сказывается неблагоприятно на коммутации тока, как то увидим в дальнейшем.

Переходя к количественным характеристикам обмотки, дадим выражение для секционного ее шага. Исходя из секции 1 (рис. 58) и идя по схеме обмотки, мы захватили секцию 7, лежащую под другим северным полюсом, и вернулись к секции 13, лежащей рядом с исходной (или к секции 2, лежащей рядом, но с другой стороны). При этом продвижении мы сделали p шагов по секциям, так как захватили p секций. Между двумя секциями, следующими одна за другой по схеме обмотки, имеем шаг y . Таким образом мы прошли всего py секций, число же

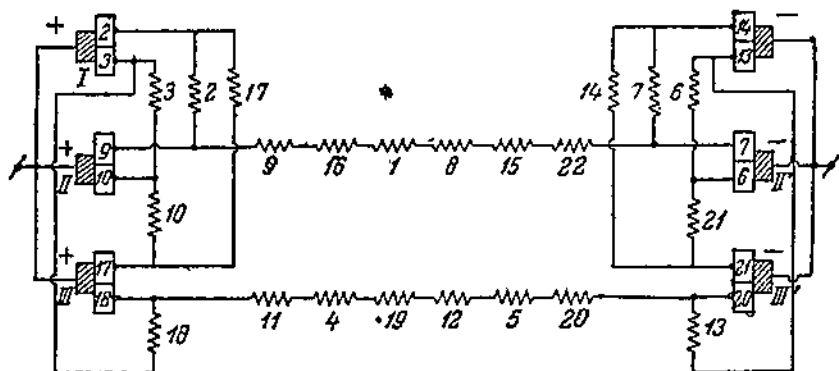


Рис. 60, б.

пройденных секций равно полному числу их для всей обмотки (S) без одной (или на одну больше). Отсюда:

$$py = S \pm 1$$

или

$$y = \frac{S \pm 1}{p}. \quad (13)$$

Для шага по коллектору будем иметь, на основании точно таких же соображений:

$$y_k = \frac{K \pm 1}{p}. \quad (14)$$

Результирующий шаг необходимо разделить на два частичных шага y_1 и y_2 , понимая под этими шагами то же, что и для параллельной обмотки. Обычно делают:

$$y_1 \cong y_2$$

что, впрочем, не всегда удается, так как шаг y может быть нечетным числом. В последнем случае выбирают y_1 -и y_2 возможно близкими друг к другу. На рис. 58, а и 58, б шаги имеют значения: $y = 6$, $y_1 = 3$, $y_2 = 3$, $y_k = 6$. На рис. 60 имеем: $y = 7$, $y_1 = 4$, $y_2 = 3$, $y_k = 7$.

В последовательной обмотке всегда имеет место соотношение:

$$y_1 + y_2 = y, \quad (15)$$

тогда как для параллельной имеем по ф-ле (3):

$$y_1 - y_2 = y.$$

Объединяя обе формулы в одну, получим:

$$y_1 \pm y_2 = y, \quad (16)$$

причем верхний знак (+) отвечает волновой обмотке, а нижний (—) — петлевой.

Все изложенное выше, применительно к параллельной обмотке, о первом частичном шаге y_1 и зубцовом шаге y_2 , так же, как и ф-лы (5) для шага y_1 , (9) для шага y_2 и соотношение (7), связывающее эти шаги, остаются в силе и для последовательной обмотки.

5. Множественно-последовательные обмотки.

На основании всего сказанного применительно к множественно-параллельным обмоткам не представляет затруднений перейти к множественно-последовательным обмоткам и формулам для их шагов. Вдвигая, как это делали ранее, между кол-

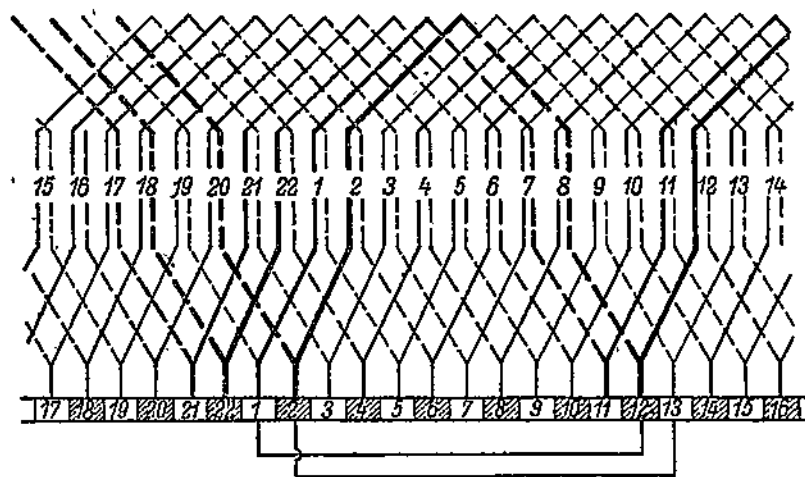


Рис. 61. Множественно-последовательная обмотка.

$$S = K = 22; \quad p = 2; \quad y = \frac{S \pm m}{p} = \frac{22 - 2}{2} = 10; \quad y_1 = \frac{22}{2 \cdot 2} + \frac{1}{2} = 6; \\ y_2 = 10 - 6 = 4; \quad \varepsilon = +\frac{1}{2}.$$

латорными пластинами, присоединенными к простой последовательной обмотке, еще столько же пластин и присоединяя эти новые пластины ко второй, наложенной на тот же якорь, обмотке, получим двукратно замкнутую последовательную обмотку,

состоящую из двух простых. Таких простых обмоток можно поместить на якорь теоретически сколько угодно.

Ввиду того, что каждая простая последовательная обмотка имеет две параллельные ветви, можно получить любое число параллельных ветвей, совместив ряд обмоток (схема рис. 61).

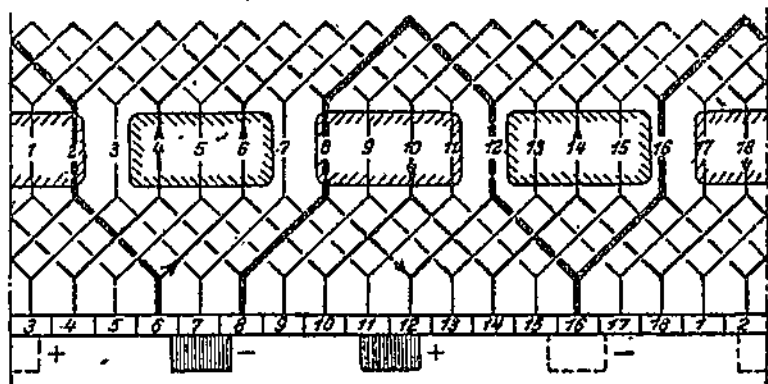


Рис. 62, а.

Практически устраивают множественно-последовательную обмотку в тех случаях, когда двух параллельных ветвей простой последовательной обмотки оказывается недостаточно, а устройство параллельной обмотки дает слишком большое число ветвей. Путем выбора той или иной обмотки можно, поэтому, иметь

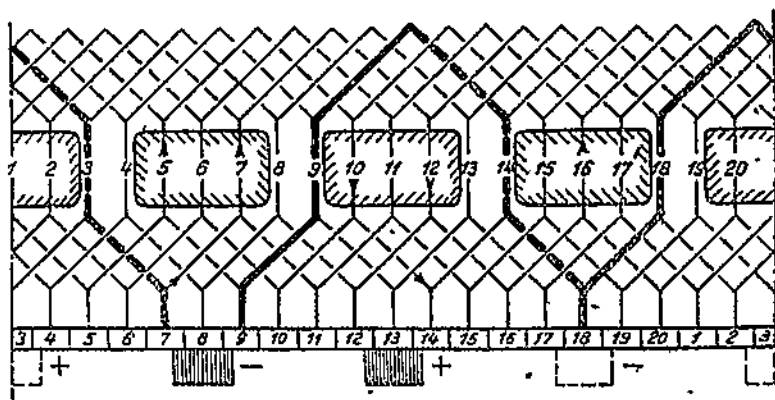


Рис. 62, б.

любое число параллельных ветвей при любом числе полюсов. Практически, однако, как увидим далее, не все типы обмоток являются пригодными для каждого числа полюсов.

Множественно-последовательная обмотка так же, как и параллельная, может быть замкнутой не только многократно, но и однократно. На рис. 62, а дана многократно замкнутая обмотка, состоящая из двух простых ($m=2$). Однократно замкнутую

обмотку легко получить, если изменить число секций, как это сделано на рис. 62, б. В таком случае число параллельных ветвей обмотки остается равным четырем. Число щеток может быть сделано равным двум (по числу ветвей каждой из простых последовательных обмоток), обычно же ставят щетки во всех нейтральных зонах, т. е. в случае рис. 62, а и 62, б—четыре щетки.

Что касается шагов множественно-последовательной обмотки, то можно получить для них выражение, исходя из тех же соображений, которые были нами применены для простой последовательной обмотки. Разница будет только в том, что, обойдя один раз вокруг якоря, мы не дойдем до исходной секции не на одну, а на a секций, так как теперь на якоре лежит не одна, а $m=a$ обмоток. Отсюда результирующий секционный шаг:

$$y = \frac{S \pm a}{p}, \quad (17)$$

где S —попрежнему полное число секций.

Шаг по коллектору:

$$y_k = \frac{K \pm a}{p}. \quad (18)$$

Как и в случае параллельной обмотки, множественно-последовательная может иметь различное число замыканий. Это число замыканий равно общему наибольшему делителю чисел y_k и K , а следовательно, и a . Разделив обе части формулы (18) на это число, получим шаг по коллектору каждой из составляющих замкнутых обмоток для случая, когда эта обмотка лежит на якоре только одна и число коллекторных пластин соответствует ей одной.

Частичные шаги выбираются для множественно-последовательной обмотки так же, как и для простой последовательной. По формуле (15):

$$y_1 + y_2 = y.$$

То же можно сказать и о зубцовом шаге.

6. Условия симметрии обмоток и некоторые несимметричные обмотки.

Для практического применения обмоток барабанного якоря необходимо, чтобы при всех положениях якоря по отношению к полюсам и щеткам они обладали одинаковыми свойствами, т. е. были вполне симметричными.

Условий, определяющих симметрию обмотки в том или ином отношении, по существу всего три.

Для того чтобы во впадинах зубчатого якоря находилось

одинаковое число проводников и, притом четное, необходимо, чтобы:

$$\frac{S}{Z} = \text{целому числу} = \frac{s_n}{2};$$

так как: $S=K$, то имеем:

$$\frac{K}{Z} = \text{целому числу}, \quad (19)$$

что и является первым условием симметрии. От этого условия иногда, впрочем, отступают в последовательных обмотках, о чем будет сказано ниже.

Следующим условием, совершенно необходимым для многополюсных машин, состоящих как бы из a двухполюсных машин, является одинаковость всех этих a машин, т. е.

$$\frac{K}{a} = \text{целому числу} \quad (20)$$

и

$$\frac{Z}{a} = \text{целому числу}. \quad (21)$$

Первое из этих условий определяет равенство чисел коллекторных пластин во всех a машинах, а второе — равенство чисел зубцов (впадин).

Далее необходимо, чтобы каждой секционной стороне, принадлежащей к одной паре параллельных ветвей, соответствовали стороны, находящиеся в других парах, в тождественных магнитных условиях. Для этого нужно, чтобы:

$$\frac{2p}{a} = \text{целому числу}, \quad (22)$$

что и определяет собой четвертое условие симметрии.

Легко показать, однако, что по существу их всего три. Перемножая выражения (19) и (21), имеем:

$$\frac{K}{Z} \cdot \frac{Z}{a} = (\text{целое число}) \times (\text{целое число}) = \text{целому числу или}$$

$$\frac{K}{a} = \text{целому числу}.$$

Отсюда следует, что при $\frac{K}{Z}$ и $\frac{Z}{a}$, равных целым числам, условие (20) всегда выполняется. В результате приходим к трем условиям симметрии:

$$\left. \begin{aligned} 1) \frac{K}{Z} &= \text{целому числу}, \\ 2) \frac{Z}{a} &= \text{целому числу}, \\ 3) \frac{2p}{a} &= \text{целому числу}. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Рассмотрим различные типы обмоток с точки зрения этих условий.

Для простой параллельной обмотки, ввиду равенства $a = p$, условие: $\frac{2p}{a} = \text{целому числу} = 2$, очевидно, всегда выполняется. Остается удовлетворить условиям 1 и 2.

Для множественно-параллельной обмотки условие 3 дает:

$$\frac{2p}{a} = \frac{2p}{mp} = \text{целому числу},$$

откуда единственно возможное значение $m = 2$.

Условие симметрии обмотки:

$$\frac{K}{a} = \frac{K}{mp} = \frac{K}{2p} = \text{целому числу}$$

указывает на необходимость четного числа коллекторных пластин. Шаг по коллектору

$$y_k = m = 2.$$

Отсюда y_k и K имеют общий делитель 2, т. е. обмотка должна быть множественной двукратно замкнутой. Только эта обмотка практически и осуществляется. Остальные условия симметрии также могут быть здесь удовлетворены.

Для простой последовательной обмотки условия симметрии 2 и 3 выполняются всегда, так как $a = 1$. Ввиду этого:

$$\frac{Z}{a} = \text{целому числу} \text{ и } \frac{2p}{a} = \text{целому числу}.$$

Необходимость удовлетворить первому условию:

$$\frac{K}{Z} = \text{целому числу} = \frac{S}{Z} = \frac{s_n}{2},$$

ведет к ограничению выбора числа зубцов машины, а также числа проводников во впадине s_n , так как шаг

$$y_k = \frac{K-1}{p} = \frac{\frac{s_n}{2}Z-1}{p} \quad (24)$$

должен быть целым числом. Вследствие этого Z и p , а также $\frac{s_n}{2}$ и p должны быть числа взаимно простые.

Еще сложнее обстоит дело в случае множественно-последовательной обмотки. Здесь условия 1, 2 и 3 могут быть выполнены далеко не всегда. Кроме того, при расчете обмотки необходимо так подобрать число зубцов и проводников во впадине, чтобы коллекторный шаг был целым числом.

В таблице 1 даны значения s_n , допускающие осуществление множественно-последовательной обмотки.

В таблицу введены s_n лишь для таких обмоток, которые применяются практически, т. е. таких, где $a < p$.

Ввиду тех ограничений, которые ставятся условиями симметрии, при практическом осуществлении простых последова-

тельных обмоток приходится иногда от одного из этих условий отступать. Такого рода отступление хотя и нежелательно, но в ограниченных пределах допустимо. Отступление это сводится к тому, что принимают:

$$\frac{K}{Z} \neq \text{целому числу}$$

с тем, однако, условием, чтобы:

$$\frac{K+1}{Z} = \text{целому числу}$$

или, так как число коллекторных пластин K равно числу секций, то выполняют обмотку из $K=S$ секций, укладывая, однако, на якорь $S+1$ секцию; одну из секций опускают из общей схемы обмотки, хотя и укладывают на якорь для того, чтобы были заполнены все впадины и имела место полная симметрия якоря с точки зрения его балансировки.

ТАБЛИЦА 1.

p	3	4	5	6	6	6	7	8	8	9	9
α	2	2	2	2	3	4	2	2	4	2	3
	2 4 — 8 10	2 — 6 — 10	2 4 6 8 —	2 4 — 8 10	2 — 6 8 10	2 4 — 8 10	2 4 6 8 10	2 — 6 — 10	2 — 6 — 10	2 4 — 8 10	2 4 — 8 10

Секция, выпадающая из общей схемы обмотки, носит название „мертвой“. Такие обмотки с мертвыми секциями применяют, например, в четырехполюсных машинах ($p=2$), когда желательно иметь $s_n=4$. Как видно из формулы (24), в случае равномерного заполнения всех впадин активными проводниками для шага y_k не получается целого значения. Выбрасывая в этом случае одну секцию, т. е. заполняя две из впадин лишь тремя активными сторонами секций и одной секции мертвой, можем осуществить обмотку.

Пусть число зубцов машины $Z=20$, $p=2$, $s_n=2$. При $K=\frac{Zs_n}{2}=20$ имеем:

$$y_k = \frac{20-1}{2} \neq \text{целому числу.}$$

Выбираем $K=19$. Тогда:

$$y_k = \frac{19-1}{2} = 9.$$

Принимая $y_1=4$, $y_2=5$, получим обмотку (рис. 63) с одной „мертвой“ секцией, которой явится секция 20.

При составлении схемы обмотки необходимо иметь в виду, что при переходе по схеме от одной секционной стороны к следующей, если переход захватывает пазы с „мертвой“ секцией, приходится считать результирующий шаг увеличенным на единицу. В данном примере приходится принять для результирующего шага второе значение:

$$y' = 9 + 1 = 10$$

и, соответственно, для второго частичного шага:

$$y'_2 = 5 + 1 = 6.$$

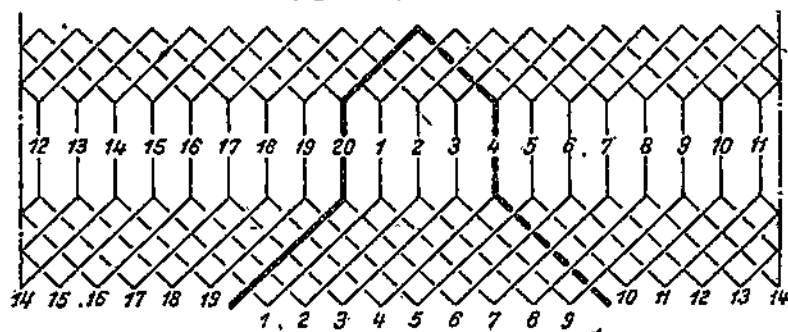


Рис. 63.

Первый частичный шаг, естественно, не может подвергаться изменению, так как обмотка должна быть приспособлена для шаблонного изготовления, что требует одинаковости всех секций. В соответствии с этим можно получить следующую таблицу соединений, согласно схеме рис. 63.

9	9	10	9	10	9	10	9	10	9	10
1—10—19—9—18—8—17—7—16—6—15—5										
9	10	9	10	9	10	9	10			
5—14—4—13—3—12—2—11—1										

Как видно из ряда соединений, второй частичный шаг принят равным 5 или 6 в зависимости от того, обходим ли „мертвую“ секцию или нет. В ряду над номерами секций поставлены соответствующие шаги.

Таблицы, подобные данной, могут быть написаны и для любой симметричной обмотки. Контролем правильности написания ее служит возврат к исходной секции после обхода всей обмотки.

7. Уравнительные соединения.

Полная симметрия тех обмоток, для которых соблюдены все три условия, рассмотренные выше, не исключает, однако, возможности появления внутренних уравнительных токов при холостом ходе машины и неравномерного распределения тока по отдельным параллельным ветвям при нагрузке. Появление

уравнительного тока в симметричной обмотке вызывается обычно теми неодинаковыми магнитными условиями, в каких могут находиться отдельные параллельные ветви машины. Чаще всего это происходит вследствие неравенства междужелезного пространства под верхними и нижними полюсами из-за сработки вкладышей подшипников. То же может иметь место и при наличии раковин в полюсных сердечниках.

Причина появления уравнительных токов при асимметрии магнитной цепи может быть установлена из рис. 64. Как видно из рисунка, междужелезное пространство под верхними полюсами (вследствие, например, неточной сборки машины) меньше, чем под нижними. В результате электродвижущие силы E_2

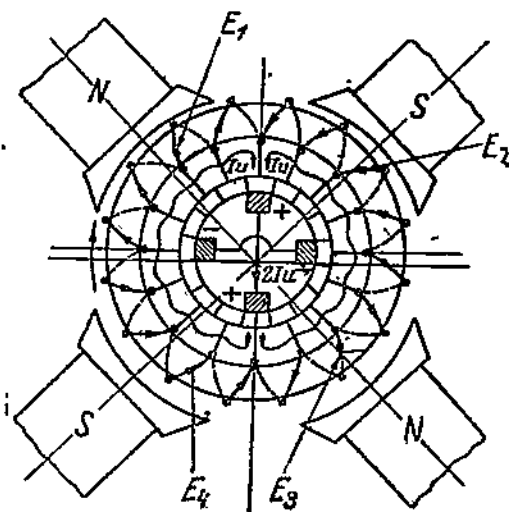


Рис. 64.

и E_1 , индуцированные в верхних ветвях замкнутой обмотки, получаются большими, чем в нижних. Это ведет к появлению в каждой половине обмотки, пересекаемой вертикальным диаметром, уравнительного тока I_u , вызванного разностью электродвижущих сил E_1 , E_2 и E_3 , E_4 . Ток этот будет замыкаться (рис. 64) через положительные щетки и их соединение.

Пусть электродвижущие силы $E_1 = E_2 = 116$ В и $E_3 = E_4 = 114$ В, сопротивление параллельной ветви равно 0,01 Ω и падение напряжения в переходном слое двух положительных

щеток составляет 1 В. Тогда уравнительный ток каждой половины обмотки:

$$I_u = \frac{116 - 114 - 1}{2 \cdot 0,01} = 50 \text{ А.}$$

В случае, если машина будет нагружена до номинального значения тока, которое предполагается в данном случае в 250 А, получим в двух верхних ветвях:

$$i_a' = \frac{250}{4} + 50 = 112,5 \text{ А,}$$

а в двух нижних:

$$i_a'' = \frac{250}{4} - 50 = 12,5 \text{ А.}$$

Верхняя положительная щетка будет перегружена, так как ток через нее окажется равным $2i_a' = 225$ А, тогда как нижняя щетка будет вести ток, равный всего лишь $2i_a'' = 25$ А. При та-

них условиях искрение под верхней щеткой почти гарантировано вследствие чрезмерной плотности тока.

Чтобы избавиться от этого неприятного явления и вместе с тем уменьшить уравнильный ток (как это будет видно из дальнейшего), достаточно сделать внутренние соединения между равнопотенциальными точками обмотки якоря. Для четырехполюсного якоря точки одинакового потенциала, т. е. лежащие в одинаковых магнитных условиях, расположены по диаметру.

Выполним одно такое диаметрально „уравнильное соединение“. На рис. 65 показано это соединение в том положении, когда точки 1, 1' присоединения его к обмотке якоря совпадают с положительными щетками. Ввиду малого сопротивления уравнильного соединения можно было бы ожидать, что значительная часть внутреннего тока, вызванного асимметрией, замкнется при данном положении якоря через это соединение.

Необходимо, однако, обратить внимание на то обстоятельство, что ток, замыкающийся через уравнильное соединение, будет переменным. Ввиду большого реактивного сопротивления обмотки якоря этот переменный ток будет иметь наибольшее значение тогда, когда э. д. с. будет равна нулю, т. е. когда уравнильное соединение расположится по горизонтальному диаметру.

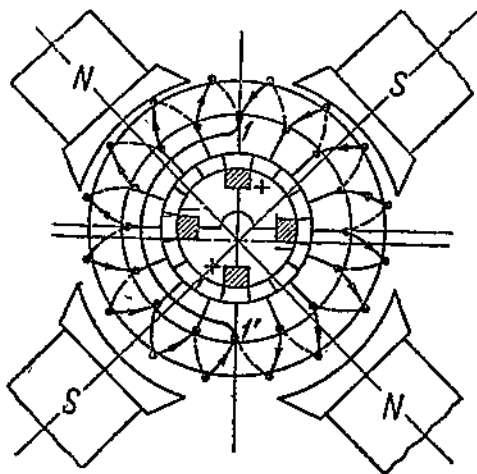


Рис. 65.

Якорь, обтекаемый током, также создает магнитное поле. Максимум этого поля будет в момент наибольшего значения тока, т. е. в нашем случае при горизонтальном положении уравнильного соединения. Направление якорного поля определяется направлениями токов в якоре. Считая, что якорь вращается в этот момент не только в поле внешних полюсов, но и в собственном поле, можем установить направление электродвижущей силы ΔE , индуцированной в якоре этим полем, как встречное разностям: $E_1 - E_2$ и $E_3 - E_4$. При этом равновесие э. д. с. будет в значительной степени восстановлено и уравнильный ток через щетки уменьшится. На рис. 66 показано направление токов и э. д. с., а также поля якоря в этот момент. Линии якорного поля показаны в предположении, что на всем пути их по неподвижной части машины магнитная проницаемость будет неизменной; в действительности это не будет иметь места; но такое отступление от действительности отразится лишь на интенсивности якорного поля. Пунктиром изображены

на рис. 66 фиктивные полюса N_a и S_a , действие которых эквивалентно якорному полю; главные полюса не показаны, чтобы не затемнять чертежа.

Из изложенного видно, что уравнительное соединение, будучи устроено на якоре в единственном числе, уничтожает влияние асимметрии магнитной цепи, а следовательно, и уравнительный ток между одноименными щетками лишь при положениях якоря, близких к изображенному на рис. 66. Для полного уничтожения уравнительных токов необходимо увеличить число соединений. Уже при двух уравнительных соединениях, расположенных по взаимно-перпендикулярным диаметрам, машина схемы рис. 66 будет работать значительно лучше. На-

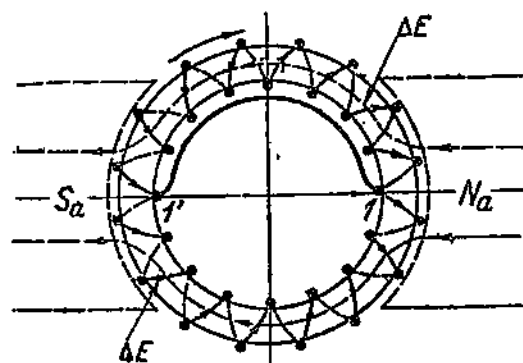


Рис. 66.

большее число возможных соединений определяется числом секций машины, приходящихся на каждую пару ее параллельных ветвей, так как каждую такую секцию можно соединить с другой, находящейся в однородных магнитных условиях в иной паре параллельных ветвей. Ввиду этого наибольшее число уравнительных соединений n_u определяется выражением:

$$n_u = \frac{K}{a},$$

так как $K = S$.

Расстояние между двумя равнопотенциальными точками, измеряемое числом пластин коллектора, определится, очевидно, тем же выражением:

$$y_u = \frac{K}{a}, \quad (25)$$

так как для перехода от одной пластины к следующей, равнопотенциальной, надо пройти пластины, принадлежащие двум параллельным ветвям. Величина y_u носит название потенциального шага. Практически иногда не делают наибольшего возможного числа уравнительных соединений, а ограничиваются одним соединением на каждую впадину, т. е. выполняют $\frac{Z}{a}$ соединений. В машинах с легкими условиями коммутации делают $\frac{Z}{2a}$ или даже $\frac{Z}{3a}$ соединений. В машинах большой мощности, а также в турбогенераторах, ввиду тяжелых условий коммутирования и большой ответственности машины, выполняют полное число соединений.

Условия появления уравнивающих токов мы рассмотрели применительно к простой параллельной обмотке кольцевого якоря и лишь при упоминании о числе этих соединений перешли к зубчатому, определяя число их числом зубцов машины. Переходя конкретно к обмоткам зубчатых якорей и останавливаясь прежде всего на простой параллельной обмотке, можем установить, что условия возникновения уравнивающих токов будут здесь менее благоприятны, чем в такой же обмотке кольцевого якоря. В самом деле, мы имели дело с такой обмоткой, у которой все активные проводники одной ветви лежали в сфере действия одного полюса. В барабанной же параллельной обмотке проводники одной ветви находятся в сфере действия двух рядом лежащих полюсов, ввиду чего асимметрия получается меньшей, но, конечно, не уничтожается. Наличие уравнивающих соединений для такой обмотки в указанном выше количестве обязательно.

Иначе обстоит дело в простой последовательной обмотке. Ввиду того, что здесь всего две параллельные ветви, обмотка не имеет равнопотенциальных точек и уравнивающие соединения не могут быть осуществлены. В них, однако, и нет надобности. Каждая ветвь последовательной обмотки барабанного якоря лежит под всеми полюсами, вследствие чего вся возможная асимметрия в магнитной системе выравнивается полностью.

В случае множественно-последовательной обмотки не делают уравнивающих соединений между пластинами, принадлежащими простым последовательным обмоткам, составляющим множественную. Однако отдельные простые обмотки соединяют между собой, замыкая уравнивательными соединениями равнопотенциальные точки их, как показано на рис. 67. Роль уравнивающих соединений в этом случае изменяется. Они предназначаются здесь не для выравнивания токов в отдельных параллельных ветвях, а для поддержания равномерного распределения потенциала по коллектору.

В самом деле, если предположить, что переходное сопротивление между коллекторными пластинами и перекрывающей их щеткой будет неодинаково для пластин, принадлежащих разным простым последовательным обмоткам, входящим в состав множественной, то равномерное распределение потенциала на коллекторе будет нарушено. Та из простых обмоток, для которой сопротивление переходного слоя будет больше, начнет отдавать

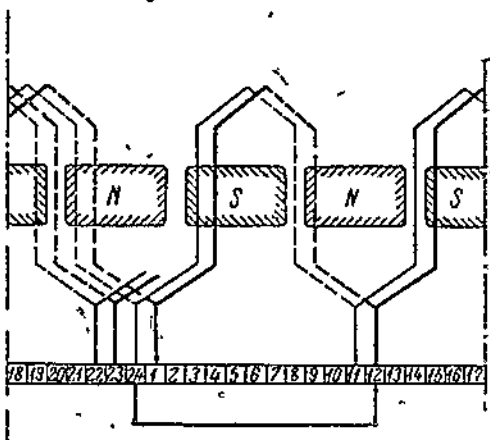


Рис. 67.

меньший ток и это сейчас же скажется на потенциалах всех стержней ее ввиду изменения падения напряжения. Коллекторные пластины, принадлежащие этой обмотке, также изменят свой потенциал, что повлечет за собой изменение разности потенциалов между этими пластинами и соседними с ними, принадлежащими другой обмотке. Последнее может неблагоприятно отозваться на коммутировании тока (см. далее).

Во избежание этого и устраивают уравнивательные соединения, которым лучше придать теперь наименование „эквипотенциальных соединений“ в соответствии с выполнением ими выравнивания потенциала по коллектору помощью внутренних, проходящих по ним токов. Часто эти соединения называют также уравнивательными соединениями 2-го рода. Шаг по коллектору для таких соединений, конечно, определяется прежней формой:

$$y_u = \frac{K}{a},$$

так как с точки зрения мест присоединений ничего не изменилось: попрежнему надо соединить точки равного потенциала. Отметим только, что для множественно-последовательных обмоток при $\frac{p}{a} \neq$ целому числу эквипотенциальные соединения приходится протягивать внутри якоря, соединяя пластины коллектора с лобовыми соединениями, лежащими со стороны якоря, противоположной коллектору. Ввиду этого надлежит стремиться применять такую множественно-последовательную обмотку, для которой не только $\frac{2p}{a} =$ целому числу, но и $\frac{p}{a} =$ целому числу.

Что же касается множественно-параллельных обмоток, то для них необходимы как уравнивательные, так и эквипотенциальные соединения. Уравнивательные соединения необходимы потому, что в них нуждается каждая из двух простых параллельных обмоток.¹⁾ Эквипотенциальные соединения необходимы для выравнивания потенциала. Легко показать, что для обмоток с $\frac{K}{p} =$ нечетному числу эквипотенциальные соединения будут служить и уравнивательными, если в машине выполнено наибольшее возможное их число. При $\frac{K}{p} =$ четному числу приходится делать и те и другие соединения, протягивая эквипотенциальные соединения внутри якоря. В самом деле: шаг уравнивательных соединений будет для множественно-параллельных обмоток:

$$y_u = \frac{K}{p},$$

так как каждая ветвь лежит под одной парой полюсов и следующая ветвь, лежащая под другой парой, имеет точки, равно-

¹⁾ Имеются в виду только симметричные обмотки, единственно применяемые.

потенциальные с первой. Если этот шаг — число четное, то это значит, что, выйдя уравнительным соединением из какой-либо пластины, принадлежащей одной из простых параллельных обмоток, входящих в состав множественной, мы придем к той же обмотке, так как пройдем попарно пластины, принадлежащие обеим обмоткам. В случае нечетного шага уравнительных соединений, выйдя из какой-либо пластины, придем к другой простой обмотке, так как очевидно, что пластины двух простых обмоток, входящих в состав множественной, лежат на расстоянии нечетного числа коллекторных делений.

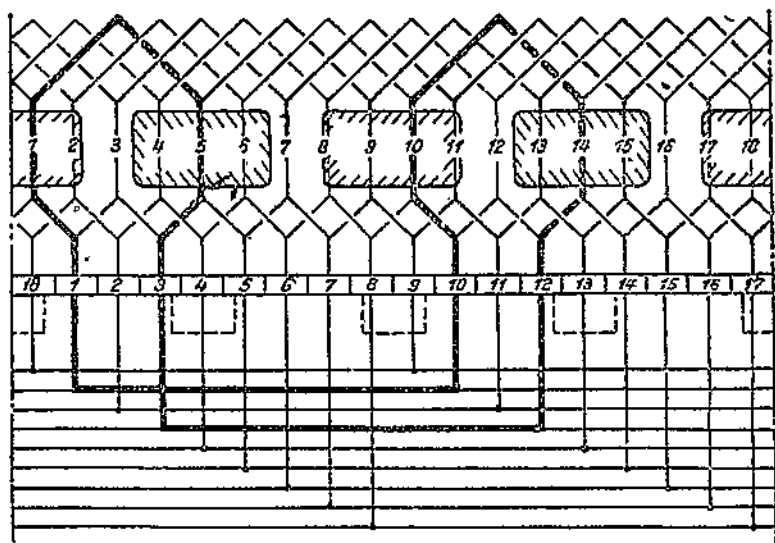


Рис. 68, а,

На рис. 68, а и 68, б показаны две схемы множественно-параллельных обмоток, из коих первая (68, а) дана для $\frac{K}{p}$ нечетного, ввиду чего здесь уравнительные соединения играют одновременно и роль эквипотенциальных, соединяя обе простые обмотки. На рис. 68, б имеем $\frac{K}{p}$ четное, ввиду чего здесь выполнены особые эквипотенциальные соединения между обеими обмотками. В этом случае равнопотенциальные точки обеих обмоток лежат на противоположных сторонах якоря, так как с одной стороны якоря имеем лишь точки равного потенциала, принадлежащие одной обмотке. Потенциал конца какого-либо стержня, лежащего в первой простой обмотке под полюсом N , будет очевидно равен потенциалу обратного конца того стержня второй простой обмотки, который лежит под полюсом S в той же точке полюсного деления. Отсюда очевидно, что эквипотенциальные соединения должны соединять противоположные стороны якоря.

Помимо уравнильных соединений 1-го и 2-го рода, рассмотренных выше, в множественно-параллельных обмотках устраивают также уравнильные соединения 3-го рода.

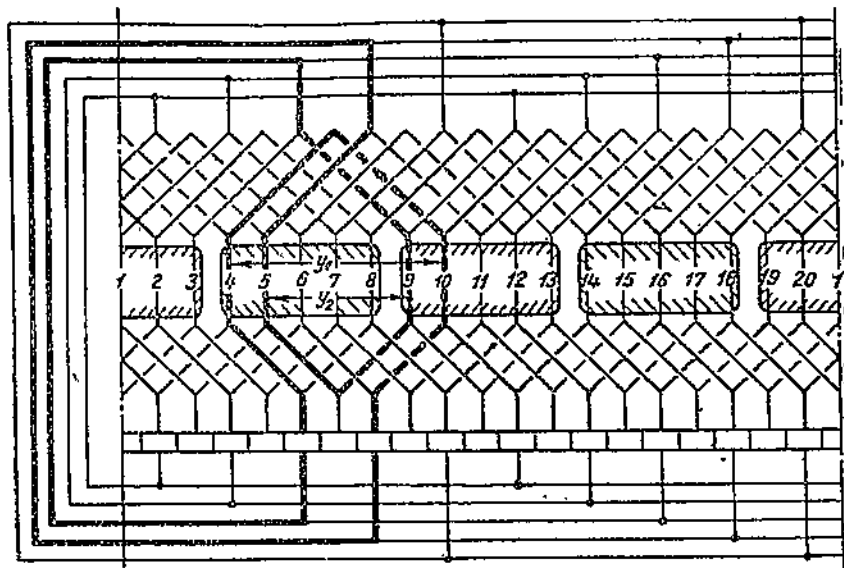


Рис. 68, б.

Роль этих соединений может быть выяснена на основании рассмотрения тех короткозамкнутых витков, которые получаются в множественно-параллельной обмотке при попадании секций в положение короткого замыкания их щетками. Такое короткое замыкание неизбежно во всякой обмотке и имеет место при переходе секции из одной параллельной ветви в другую параллельную ветвь. Выделим секции, короткозамкнутые одной из щеток рис. 68, б, тогда получим рис. 69. Как видно, две активные стороны ab и gh оказываются замкнутыми накоротко, будучи соединены последовательно (на пунктирное соединение не обращаем пока внимания), тогда как две другие активные стороны замкнуты накоротко поодиночке через уравниватели 2-го рода. Так сторона cd входит в короткозамкнутый контур: щетка, пластина 2, сторона cd , уравниватель I, пластина 3, щетка; сторона ef входит в контур: щетка, пластина 2, сторона ef , уравниватель II, пластина 1, щетка.

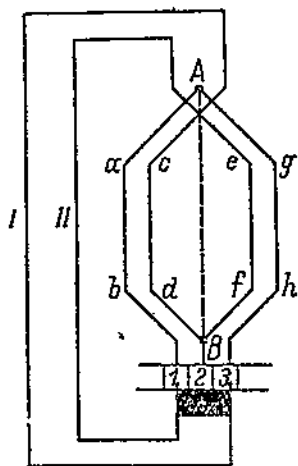


Рис. 69.

Оказывается, таким образом, что короткозамкнутые щетками контуры получаются неодинаковыми в отношении их

длины и расположения. Контур, в который входят две активные стороны, лежащие в железе якоря (сторона ab и gh), обладает большей индуктивностью, чем другие два контура, в которые входят уравниватели, проходящие через внутреннюю полость якоря и лишь частично соприкасающиеся с железом. Поскольку, однако, индуктивность короткозамкнутого щетками контура желательно иметь возможно малой, в видах благоприятного течения коммутационного процесса, то увеличенная индуктивность одного из короткозамкнутых щетками контуров весьма нежелательна.

Если соединить точки A и B обмотки (рис. 69) еще одним уравнивательным соединением (по пунктиру), то сразу видно, что секция $abgh$ разбивается на две половины этим соединением и стороны ее оказываются при коротком замыкании в параллельном соединении. Индуктивность всех сторон оказывается минимальной и одинаковой.

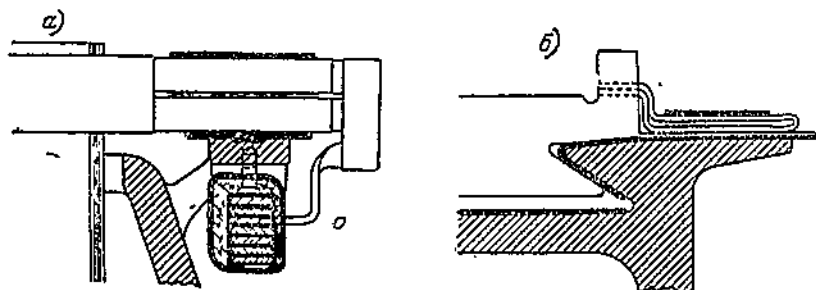


Рис. 70.

Соединение AB , служащее для выравнивания индуктивностей короткозамкнутых секций, и носит название уравнивательного соединения 3-го рода.

Уравниватели 2-го рода тоже играют, частично, роль выравнивания индуктивности, как это было видно из вышеприведенного рассуждения. Этих соединений, однако, недостаточно для полного выравнивания индуктивности. Собственно уравниватели 3-го рода должны быть выполнены при двухслойной обмотке и $\frac{K}{p}$ = четному числу, в том же числе $\frac{K}{p}$, так как в этом случае уравниватели 2-го рода берут на себя роль уравнивателей 3-го и последние должны быть выполнены только между теми точками, где нет уравнивателей 2-го рода. При $\frac{K}{p}$ = нечетному числу уравнивательные соединения 3-го рода невыполнимы, так как обмотка не может быть выполнена с точно диаметральной шагом, ввиду чего нет равнопотенциальных точек на различных сторонах якоря. В крупных машинах постоянного тока, рассчитанных на большие токи, получение безискровой работы щеток часто бывает невозможно при отсутствии уравнивателей 3-го рода.

Ввиду этого последние приобретают для таких машин весьма большое значение.

Конструктивно уравнительные соединения выполняются в виде изогнутых медных пластин, заложенных в специальную выемку, расположенную чаще всего со стороны, противоположной коллектору (рис. 70, а). Пластины присоединены к обмотке с помощью ответвлений. Иногда, в случае значительного числа мест присоединения, уравнители выполняются путем устройства вилоч (рис. 70, б), которые присоединяются к соответствующим пластинам коллектора. Сечение уравнительных проводов выбирается обычно равным сечению проводов обмотки якоря при малом числе этих соединений и несколько меньшим при большом их числе.

8. Некоторые специальные обмотки.

Для машин постоянного тока большой мощности стали применять в последнее время по предложению американской фирмы Allis Chalmers Manufact. Co. так называемую лягушачью обмотку. Эта последняя получила свое название ввиду того, что секции ее напоминают по форме лягушку и представляют сочетание петлевой и волновой обмоток, причем каждая из обмоток служит, помимо проведения половины общего тока, также и уравнительными соединениями для другой обмотки. В пазы якоря закладываются две двухслойные обмотки — петлевая и волновая, каждая имеющая половинное сечение. Числа витков и параллельных ветвей обмоток должны быть равны между собой.

Кроме того, необходимо, чтобы между обеими обмотками, которые присоединяются к одним и тем же коллекторным пластинам, не было разности потенциалов, могущей вызвать уравнительные токи. Последнее требует, чтобы сумма э. д. с., индуцированных в секции петлевой обмотки и следующей за ней по схеме секции обмотки волновой, была равна нулю при любом положении якоря. Последнее может иметь место только в том случае, когда стороны секций лежат в одинаковых магнитных условиях. Для этого начальная сторона секции петлевой обмотки и конечная сторона секции обмотки волновой, следующей за петлевой по схеме обмотки, должны лежать под одноименными полюсами (сдвиг точно на 360° электрических), тогда как конечная сторона секции петлевой обмотки и начальная сторона секции обмотки волновой должны лежать в одном и том же пазу. Это приводит к требованию, чтобы сумма ширины катушек обеих обмоток равнялась двойному полюсному делению.

Кроме того, необходимо, чтобы между пластинами, лежащими в начале секции петлевой обмотки и в конце секции обмотки волновой, следующей за секцией петлевой, не было разности потенциалов, вызванной другими частями обмотки. Последнее приводит к требованию, чтобы сумма коллекторных ша-

гов обеих обмоток равнялась потенциальному шагу. Выразая оба требования математически, имеем:

$$y_{1p} + y_{1w} = \frac{K}{p},$$

$$y_{kp} + y_{kw} = \frac{K}{p} = y_u,$$

где: y_{1p} и y_{1w} — первые частичные шаги петлевой и волновой обмоток, y_{kp} и y_{kw} — коллекторные шаги петлевой и волновой обмоток.

Замечая, что:

$$y_{kp} = y_{1p} - y_{2p},$$

$$y_{kw} = y_{1w} + y_{2w},$$

складывая и подставляя первые два уравнения, найдем:

$$y_{2p} = y_{2w},$$

т. е. вторые частичные шаги обеих обмоток должны быть равны между собой. Обмотки могут быть выполнены с диаметральными шагами или с шагами, отличными от диаметральных. В последнем случае шаг одной из обмоток может быть укорочен, но шаг второй должен быть в той же мере удлинен.

На рис. 71, а дана схема лягушачьей диаметральной обмотки со следующими данными:

$K = 24$, $S = 24$, $s_n = 4$, $2p = 6$, $2a = 6$ (каждой из обмоток),

$$y_{1p} = y_{1w} = \frac{K}{2p} = \frac{24}{6} = 4,$$

$$y_{kp} = 1, y_{kw} = \frac{K - a}{p} = \frac{24 - 3}{3} = 7,$$

$$y_u = \frac{K}{p} = \frac{24}{3} = 8 = y_{kp} + y_{kw}.$$

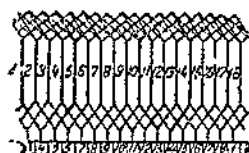


Рис. 71, а.

Имеем, таким образом, простую петлевую обмотку и множественно-последовательную с коэффициентом множественности:

$$m = a = 3.$$

Схема рис. 71, б дает хордовую лягушачью обмотку. Здесь: $K = 18$, $Z = 18$, $s_n = 4$, $2p = 4$, $2a = 4$ (каждой из обмоток),

$$y_{1p} = 4, y_{1w} = 5,$$

$$y_{kp} = 1, y_{kw} = \frac{18 - 2}{2} = 8,$$

$$y_u = y_{kp} + y_{kw} = 9.$$

Здесь петлевая обмотка простая, а волновая — множественная, двукратно замкнутая. Петлевая обмотка может быть, конечно,

выполнена в виде множественной в случае необходимости иметь большое число параллельных ветвей.

Общий вид секций лягушачьей обмотки показан на рис. 72.

Рис. 72, а дает вид двух совмещенных секций, из коих одна принадлежит волновой, а другая — петлевой обмотке. Секции имеют одинаковый шаг,

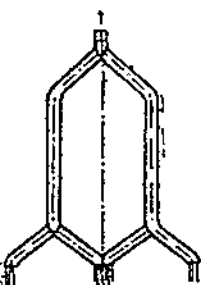


Рис. 72, а.

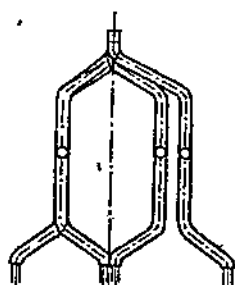


Рис. 72, б.

так как обмотка предположена диаметральной. Рис. 72, б дает секции хордовой обмотки. В этом случае секции имеют различный шаг. Начала обеих секций, принадлежащих одна волновой обмотке, а другая петлевой, лежат в одном и том же пазу, концы же секций расположены в различных пазах, как то следует из схемы рис. 71, б.

Весьма ценным свойством лягушачьей обмотки является уже упомянутое вследствие отсутствие уравнивающих соединений. На рис. 73 показана обмотка рис. 71, б в несколько упрощенном виде. Здесь наверху нанесены два обхода одной из простых волновых обмоток, входящих в состав множественной (сплошные линии лобовых частей), и один обход второй простой волновой обмотки (пунктирные линии лобовых частей).

Как было указано в предыдущем разделе, такая множественно-последовательная обмотка нуждается в уравнивателях 2-го рода. Обращаясь теперь к схеме петлевой обмотки, входящей также в состав лягушачьей обмотки, нанесем внизу рис. 73 две ее секции (b и c), соединяющие пластины, принадлежащие одной из простых волновых обмоток.

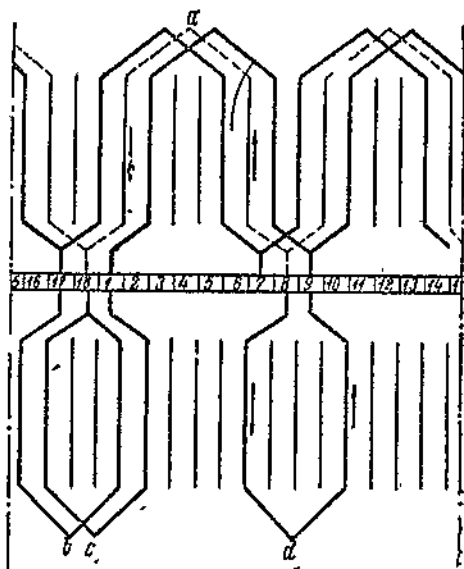


Рис. 73.

Потенциал пластины № 18, принадлежащей второй последовательной обмотке, окажется тогда равным половине потенциала между пластинами 1-й и 17-й благодаря тому, что к пластине № 8 присоединена середина тех двух секций петлевой обмотки, которые лежат между пластинами № 17 и 1. Надобность в фиксации этого потенциала уравнивающим соединением, лежащим

между пластинами №№ 18 и 9, отпадает. Оказывается, что петлевая обмотка играет для волновой роль уравнивателей 2-го рода.

Обращаясь теперь к петлевой обмотке, которая сама по себе также нуждается в уравнивательных соединениях, видим, что пластина № 18 в схеме, где петлевая обмотка лежала бы на якоре только одна, должна была бы соединяться с пластиной № 9 уравнивателем 1-го рода. Через волновую обмотку пластина № 18 соединяется, однако, не с № 9, а с пластиной № 8, имеющей отличный потенциал. Благодаря тому, что в секции волновой обмотки, лежащей между пластинами №№ 18 и 8, индуктируется э. д. с., соединение пластин №№ 18 и 8 оказывается возможным, ибо эта э. д. с. как раз равна и прямо противоположна недостающей разности потенциалов между пластинами №№ 8 и 9.

Последнее легко видеть, если обратить внимание на то обстоятельство, что разность потенциалов между пластинами №№ 8 и 9 обусловлена э. д. с. той секции (д) петлевой обмотки, которая расположена между этими пластинами. Наноса направление э. д. с., индуктированной в этой секции (д), а также относительное направление э. д. с., индуктированной в секции а волновой обмотки, видим, что они взаимно противоположны. Отсюда очевидно, что волновая обмотка играет роль уравнивательных соединений для обмотки петлевой, хотя и соединяет неравнопотенциальные точки. Балансируя своей э. д. с. имеющуюся между этими точками разность потенциалов, волновая обмотка дает возможность протекать по ней уравнительным токам, вызванным асимметрией петлевой обмотки. Обмотка оказывается снабженной полным числом уравнивательных соединений что делает ее применимой для машин с тяжелыми условиями коммутирования тока, как, например, прокатных двигателей.

Опыты, поставленные на ХЭМЗе с машинами, снабженными лягушачьей обмоткой, дали весьма удовлетворительные результаты.

К специальным обмоткам машин постоянного тока принадлежат также двухколлекторные.

В машинах на большую силу тока и необходимом при этом перекрытии щеткой большого числа коллекторных пластин, бывает желательно уменьшить это перекрытие, обеспечив тем самым более надежный контакт щетки с коллектором. В этом случае можно разделить коллектор множеством параллельной двукратно замкнутой обмотки на два коллектора, расположив коллекторы с двух сторон якоря и выполнив их с половинным числом пластин каждый по сравнению с единым коллектором множеством параллельных обмотки. На якорь наложены тогда две простые параллельные обмотки, причем, для того, чтобы расположенные в одних и тех же пазах обе обмотки давали одинаковую полярность щеток, расположенных по общей образующей цилиндрической поверхности, охватывающей оба коллектора, а также для того, чтобы было удобно выполнить уравнитель-

ные соединения 2-го рода, необходимо одну из обмоток выполнить правой, а другую — левой. Необходимость в уравнительных соединениях здесь не отпадает, так как щетки включаются в параллель и равнопотенциальные точки обмоток должны быть соединены между собой. На рис. 74 дана часть двухколлекторной обмотки; здесь показана часть уравнителей. Каждая из простых параллельных обмоток должна быть также снабжена уравнителями 1-го рода.

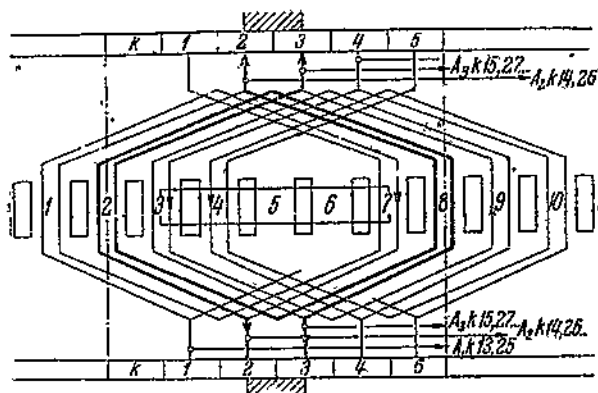


Рис. 74.

9. Сравнение и выбор обмоток.

Сопоставляя все сказанное об обмотках различных типов, резюмируя свойства каждой из них, сравним обмотки с точки зрения практического их применения.

Простая параллельная обмотка имеет всегда число параллельных ветвей $2a = 2p$. Число щеточных комплектов равно $2p$. Необходимы уравнительные соединения в указанном выше количестве. Ширина щетки обычно выбирается в пределах 1,5—3 коллекторных делений.

Простая последовательная обмотка дает возможность получить при любом p число параллельных ветвей $2a = 2$. Число щеточных комплектов обычно равно $2p$, но возможно ограничиться всего двумя комплектами щеток. Щетки перекрывают число пластин коллектора не меньшее, скорее даже большее, чем в параллельной обмотке, независимо от того, берем ли $2p$ комплектов щеток или только 2. Это объясняется тем, что в первом случае при неравенстве переходных сопротивлений отдельных щеток может получиться различное распределение тока по щеткам, что поведет к перегрузке некоторых щеток, если они рассчитаны на $\frac{1}{p}$ -ую часть тока. Обмотка не нуждается в уравнительных соединениях.

Симметричная множественно-параллельная обмотка имеет число параллельных ветвей $2a = 4p$. Число щеточных комплектов равно $2p$. Необходимы уравнительные соединения всех

трех родов. Ширина щетки должна быть не менее трех коллекторных делений — для обеспечения съема тока со всех параллельных ветвей.

Множественно-последовательная обмотка может теоретически иметь любое число пар параллельных ветвей $2a > 2$. Однако ввиду необходимости соблюдать условия симметрии число этих ветвей для каждого числа полюсов ограничено. Число щеточных комплектов обычно равно $2p$, хотя можно применять только два комплекта щеток. Во всех случаях ширина щеток должна быть не меньше a делений, что ставит предел применению обмотки, ограничивая число пар параллельных ветвей четырьмя (вследствие невозможности применить более широкие щетки). Необходимы эквипотенциальные соединения.

При выборе той или другой обмотки надлежит также учитывать возможность получения от машины заданной э. д. с. при наименьшем числе отдельных секционных сторон и при наибольшем возможном их сечении. Это обусловлено тем, что изоляция проводников большого поперечного сечения занимает во впадине относительно мало места, последнее же позволяет как экономить на изоляции, так и уменьшать размеры впадин, а следовательно, и всей машины. Необходимо, поэтому, стремиться к наименьшему возможному, с точки зрения безыскровой коммутации, числу параллельных ветвей обмотки. Отсюда — первой обмоткой, к которой следует обращаться при расчете машины, является простая последовательная.

Если по условиям допустимой величины тока в одном стержне (не более 250—300 А¹), или же вследствие слишком высокой разности потенциалов между соседними коллекторными пластинами, эту обмотку применить нельзя, естественно перейти к простой параллельной.

Если число пар полюсов машины велико и значение тока в каждой параллельной ветви при наличии простой параллельной обмотки получается слишком малым, можно обратиться к множественно-последовательной обмотке, которая по числу ветвей является промежуточной между последовательной и параллельной обмотками. Позволяя получить $2a < 2p$, множественно-последовательная обмотка может дать лучшие условия в отношении заполнения впадины (относительно меньшее количество изоляции), по является более сложной в осуществлении и худшей в эксплуатации (вследствие возможной неравномерности распределения тока по щеткам при полном их числе).

Наконец, последний тип обмотки — множественно-параллельную — приходится применять лишь в крайних случаях.

Таким образом выбор обмоток следует производить в таком порядке: 1) простая последовательная, 2) простая параллельная, 3) множественно-последовательная, 4) множественно-параллельная.

¹) При силах тока, больших 4000 А, идут до значений тока в одной параллельной ветви, доходящих до 375—400 А.

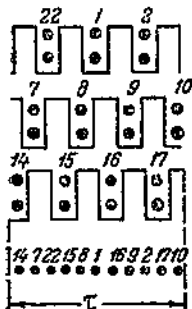
10. Индуцированная в обмотке якоря электродвижущая сила и ее пульсации.

Мгновенное значение электродвижущей силы e_x , индуцированной в одном проводнике длиной l см при движении его в магнитном поле индукции B_x со скоростью v см/сек, может быть представлено, согласно закону Фарадея, в следующем виде:

$$e_x = B_x l v \cdot 10^{-8} \text{ вольт.}$$

Ввиду того, что в каждой параллельной ветви якоря находится целый ряд последовательно соединенных проводников, можем написать выражение э. д. с. ветви:

$$e_a = \Sigma e_x.$$



Эта э. д. с. индуцируется в $\frac{N}{2a}$ последовательно соединенных проводниках, где N — полное число активных проводников якоря. При равномерном распределении проводников на окружности якоря и достаточно большом их числе имеем на дуге якоря dx число проводников:

$$\frac{N}{2a} \cdot \frac{dx}{\tau}.$$

Рис. 75.

Отметим, что данное соотношение будет верно безоговорочно для якоря с кольцевой обмоткой. Для барабанного якоря имеем проводники одной параллельной ветви расположенными под двумя полюсами (параллельная обмотка) или под всеми полюсами (волновая обмотка). В случае параллельной обмотки с диаметральной шагом расположение верхних активных сторон под одним из полюсов будет таким же, как и расположение нижних сторон под соседним полюсом. Рассматривая верхние проводники, лежащие на одном полюсном делении (τ), мы учитываем нижние, принадлежащие к той же параллельной ветви, простым удвоением э. д. с., так как под N подразумеваем полное число активных проводников.

В случае последовательной обмотки верхние проводники расположены под p полюсами, причем они сдвинуты в магнитном поле. Рассматривая индуцирующее действие этих p полюсов, мы можем, очевидно, заменить их одним эквивалентным полюсом, расположив проводники в его поле так же, как они лежат в поле p полюсов. На рис. 75 показана картина расположения пазов, лежащих под северными полюсами на совмещенном полюсном делении для обмотки рис. 60, а.

Ввиду этого э. д. с., индуцированная в проводах, расположенных на $\frac{dx}{\tau}$ части полюсного деления, получит выражение

$$\frac{N}{2a} \frac{dx}{\tau} e_x = \frac{N}{2a} \frac{lv}{\tau} B_x dx \cdot 10^{-8} \text{ вольт.}$$

Полная э. д. с. параллельной ветви:

$$E_a = \frac{N}{2a} l v 10^{-8} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} B_x dx = \frac{N}{2a} l v B_{\text{med}} 10^{-8} \text{ вольт},$$

так как $\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} B_x dx$ представляет, очевидно, среднее значение ординаты кривой поля. Отметим, что, строго говоря, здесь нельзя брать интеграл, так как суммирование распространяется на конечное число проводников, вводя же элемент дуги dx , мы, тем самым, предполагаем, что э. д. с. индуцируется в бесконечно малой части всех $\frac{N}{2a}$ проводников. В этом случае все линии поля принимают участие в индуктировании э. д. с. и $\int_0^{\tau} B_x dx$ дает весь поток на единицу длины якоря. На самом деле проводники хотя и не сплошь занимают всю поверхность якоря, но все же располагаются на якоре в таком большом количестве, что в индуктировании э. д. с. принимает участие почти весь поток. Подставляя значение окружной скорости

$$v = \frac{\pi D n}{60} \text{ см/сек},$$

где D — диаметр якоря в сантиметрах, а n — число оборотов якоря в минуту, имеем:

$$E_a = \frac{N}{2a} l \frac{\pi D n}{60} B_{\text{med}} 10^{-8} \text{ вольт}.$$

Вводя сюда вместо индукции магнитный поток, входящий в якорь:

$$\Phi_a = B_{\text{med}} l \tau,$$

откуда

$$l B_{\text{med}} = \frac{\Phi_a}{\tau},$$

а также полюсное деление:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p},$$

откуда

$$\pi D = 2p\tau,$$

имеем:

$$E_a = \frac{N}{2a} \frac{\Phi_a}{\tau} \frac{2p\tau n}{60} 10^{-8} \text{ вольт}$$

или после сокращений:

$$E_a = \frac{pn}{60} \Phi_a \frac{N}{a} 10^{-8} = c_n \Phi_a \text{ вольт.} \quad (26)$$

Последняя формула может быть переписана еще так:

$$E_a = 4fw\Phi_a 10^{-8} \text{ вольт,} \quad (27)$$

где $f = \frac{pn}{60}$ и $w = \frac{N}{2 \cdot 2a}$.

Величина f есть частота изменения э. д. с. переменного направления, индуктированной в каждом проводнике якоря. За один оборот якоря имеем p периодов э. д. с. При $\frac{n}{60}$ оборотах якоря в секунду получится за это время $\frac{pn}{60}$ периодов изменения э. д. с. проводника.

Величина w есть число последовательно соединенных витков, входящих в каждую параллельную ветвь машины.

Величина э. д. с. машины постоянного тока, определяемая ф-лой (26), не будет, однако, оставаться строго неизменной при вращении якоря. Рассматривая простейший случай обмотки при двух положениях якоря, мы установили, что положение активных сторон якоря по отношению к щеткам не будет оставаться неизменным, несмотря на то, что одна сторона непрерывно сменяется другой. В зависимости от общего числа секций и связанных с ними коллекторных пластин пульсации э. д. с. будут иметь то или иное значение.

Ввиду того, что в каждой секции обмотки индуктируется переменная э. д. с., выпрямляемая коллектором, можно написать (предполагая распределение поля синусоидальным) для мгновенного значения электродвижущей силы e_s любой секции:

$$e_s = E_s \sin(\omega t + \varphi_k),$$

где φ_k — угол между радиусами, идущими от центра якоря к секциям 1-й и K -й; t — время, протекшее от момента прохождения 1-й секции через нейтральную зону; $\omega = \frac{2\pi}{T}$ — угловая скорость вращения якоря, выраженная в электрических радианах в секунду (напоминаем, что $\alpha_e = p\alpha$). Суммируя э. д. с. всех q секций, заключенных между двумя разноименными щетками, имеем результирующую э. д. с. ветви:

$$L_a = E_s [\sin \omega t + \sin(\omega t + \varphi_2) + \sin(\omega t + \varphi_3) + \dots + \sin(\omega t + \varphi_q)].$$

Для положения якоря машины, согласно рис. 39, имеем 6-ю секцию под углом $\frac{\alpha}{2}$ к нейтрали, где α — угол между радиусами, проведенными к двум соседним секциям. Тогда:

$$\omega t = \frac{\alpha}{2}, \quad \varphi_2 = \alpha, \quad \varphi_3 = 2\alpha, \dots, \varphi_q = (q-1)\alpha,$$

откуда найдем:

$$e_a = E_s \left[\sin \frac{\alpha}{2} + \sin \left(\frac{\alpha}{2} + \alpha \right) + \sin \left(\frac{\alpha}{2} + 2\alpha \right) + \dots + \sin \left\{ \frac{\alpha}{2} + (q-1)\alpha \right\} \right].$$

После поворота якоря на $\frac{\alpha}{2}$ таким же образом получим:

$$e''_{\alpha} = E_s [\sin \alpha + \sin 2\alpha + \sin 3\alpha + \dots + \sin (q-1)\alpha].$$

По математической формуле:¹⁾

$$\begin{aligned} \sin \beta + \sin (\beta + \alpha) + \sin (\beta + 2\alpha) + \dots + \sin \left\{ \beta + (q-1)\alpha \right\} = \\ = \frac{\cos \left(\beta - \frac{\alpha}{2} \right) - \cos \left[\beta + \left(q - \frac{1}{2} \right) \alpha \right]}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \end{aligned}$$

1) Формула эта выводится следующим образом. Имеем известное выражение

$$2 \sin a \sin b = \cos (a - b) - \cos (a + b),$$

откуда:

$$2 \sin \frac{\alpha}{2} \sin (\beta + i\alpha) = \cos \left(\frac{\alpha}{2} - \beta - i\alpha \right) - \cos \left(\frac{\alpha}{2} + \beta + i\alpha \right).$$

В нашем случае $i = 0, 1, 2, 3 \dots q-1$.

Следовательно:

$$2 \sin \frac{\alpha}{2} \sin \beta = \cos \left(\frac{\alpha}{2} - \beta \right) - \cos \left(\frac{\alpha}{2} + \beta \right);$$

$$2 \sin \frac{\alpha}{2} \sin (\beta + \alpha) = \cos \left(\frac{\alpha}{2} - \beta - \alpha \right) - \cos \left(\frac{\alpha}{2} + \beta + \alpha \right);$$

$$2 \sin \frac{\alpha}{2} \sin (\beta + 2\alpha) = \cos \left(\frac{\alpha}{2} - \beta - 2\alpha \right) - \cos \left(\frac{\alpha}{2} + \beta + 2\alpha \right);$$

$$\begin{aligned} 2 \sin \frac{\alpha}{2} \sin \left[\beta + (q-1)\alpha \right] = \cos \left[\frac{\alpha}{2} - \beta - (q-1)\alpha \right] - \\ - \cos \left[\frac{\alpha}{2} + \beta + (q-1)\alpha \right]; \end{aligned}$$

или

$$2 \sin \frac{\alpha}{2} \sin \beta = \cos \left(\frac{\alpha}{2} - \beta \right) - \cos \left(\frac{\alpha}{2} + \beta \right);$$

$$2 \sin \frac{\alpha}{2} \sin (\beta + \alpha) = \cos \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right) - \cos \left(\beta + \frac{3\alpha}{2} \right);$$

$$2 \sin \frac{\alpha}{2} \sin (\beta + 2\alpha) = \cos \left(\beta + \frac{3\alpha}{2} \right) - \cos \left(\beta + \frac{5\alpha}{2} \right);$$

$$2 \sin \frac{\alpha}{2} \sin \left[\beta + (q-1)\alpha \right] = \cos \left[\beta + \left(q - \frac{3}{2} \right) \alpha \right] - \cos \left[\beta + \left(q - \frac{1}{2} \right) \alpha \right].$$

Складывая q таких выражений, получим:

$$\begin{aligned} 2 \sin \frac{\alpha}{2} \left\{ \sin \beta + \sin (\beta + \alpha) + \sin (\beta + 2\alpha) + \dots + \right. \\ \left. + \sin \left[\beta + (q-1)\alpha \right] \right\} = \cos \left(\frac{\alpha}{2} - \beta \right) - \cos \left\{ \beta + \left(q - \frac{1}{2} \right) \alpha \right\}; \end{aligned}$$

откуда окончательно будем иметь:

$$\begin{aligned} \sin \beta + \sin (\beta + \alpha) + \sin (\beta + 2\alpha) + \dots + \sin \left\{ \beta + (q-1)\alpha \right\} = \\ = \frac{\cos \left(\frac{\alpha}{2} - \beta \right) - \cos \left\{ \beta + \left(q - \frac{1}{2} \right) \alpha \right\}}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \end{aligned}$$

можем определить обе суммы синусов. Полагая в первом случае $\beta = \frac{\alpha}{2}$ и во втором $\beta = \alpha$, имеем:

$$e'_a = E_s \frac{\cos\left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\alpha}{2}\right) - \cos\left(\frac{\alpha}{2} + q\alpha - \frac{\alpha}{2}\right)}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} = \\ = E_s \frac{2}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} = E_s \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}}; \quad (28')$$

$$e''_a = E_s \frac{\cos\left(\alpha - \frac{\alpha}{2}\right) - \cos\left(\alpha + q\alpha - \frac{\alpha}{2}\right)}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} = \\ = E_s \frac{2 \cos \frac{\alpha}{2}}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} = E_s \cotg \frac{\alpha}{2}. \quad (28'')$$

Величина пульсации напряжения, выражаемая наибольшим отклонением от среднего значения, в процентах от среднего значения будет:

$$\Delta e = \frac{e'_a - e''_a}{e'_a + e''_a} 100 = \frac{1 - \cos \frac{\alpha}{2}}{1 + \cos \frac{\alpha}{2}} 100 = 100 \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}. \quad (29)$$

Переходя от углов между секционными сторонами к углам между пластинами коллектора, будем иметь:

$$\alpha_e = p\alpha_1 = \frac{2\pi}{K} p = \frac{\pi}{2p}; \quad (30)$$

для различных значений $\frac{K}{2p}$ можем вычислить величину пульсации э. д. с. (см. табл. 2).

ТАБЛИЦА 2.

$\frac{K}{2p}$	1	2	5	7,5	10	12	18	30	45
Δe в %	100	17	2,51	1,10	0,62	0,43	0,19	0,069	0,03

Как видно из таблицы, уже при $\frac{K}{2p} = 10$, т. е. при 20 пластинах на пару полюсов, — колебание напряжения составляет лишь 0,62%, т. е. $\Delta e < 1\%$.

Вышеприведенный вывод относится к случаю, когда $\frac{K}{p}$ — четному числу; если же оно нечетное, то пульсации будут еще меньше. Практически во всех нормальных машинах постоянного тока пульсациями напряжения можно пренебречь.

II. Техническое выполнение обмоток.

Обмотка якоря машины постоянного тока изготавливается, почти как правило, из отдельных секций, заготовленных заранее на так называемых шаблонах. Отсюда название — шаблонная обмотка. Медь секций якоря придает необходимую форму на специальных приспособлениях, после чего изолируют отдельные элементы и передают их обмотчику для укладки на якорь и соединения к коллектору. Только у мелких машин наматывают якоря вручную.

Материалом для предварительно заготовленных секций якорной обмотки являются:

Медь, полученная электролитическим путем, отоженная. Сечение меди бывает круглое или прямоугольное; в последнем случае необходимо закругление краев, чтобы острые края не прорезали изоляцию. Применяемая для обмотки медь обычно обладает следующими данными:

а) удельным сопротивлением $0,017 \text{ } \Omega$ с допуском превышением в 3% ,

б) плотностью (при температуре 20°C) $8,89 \text{ g/cm}^3$,

в) коэффициентом увеличения сопротивления $0,000068 \text{ } \Omega$ на 1°C для образца длиной в 1 m при сечении в 1 mm^2 .

В среднем можно принять относительное увеличение сопротивления, при увеличении температуры на 1° сверх 20°C , для образца длиной 1 m и сечением в 1 mm^2 :

$$\alpha = 0,000068 : \frac{1}{57} = 0,004.$$

Изоляция (хлопчатобумажная нитка) наматывается на проводник в один или два слоя. Медь с одним слоем хлопчатобумажной обмотки обозначается ПБО (провода бумажная однослойная), а с двумя слоями — ПВД (провода бумажная двухслойная). Для прямоугольных проводников применяется изоляция из хлопчатобумажной ленты; эта же лента употребляется для изолирования лобовых частей обмотки.

Паз, куда закладываются стороны секций, также должен быть изолирован. В качестве пазовой изоляции применяют следующие материалы:

Прессшпан — прессованный картон. Толщина прессшпана — от $0,1$ до 3 mm . Рулон прессшпана имеет ширину в 1 m .

Латероид — сильно спрессованный картон, пропитанный лаком или маслом. Имеет темносерый цвет. Толщина латероида — $0,1 \text{ mm}$ и выше.

Миканит — щипаная слюда, склеенная шеллачным лаком.

Микафоль — щипаная тонкая слюда, наклеенная на тонкую кабельную или японскую бумагу при помощи шеллачного лака. Толщина микафоля $0,10$ — $0,20 \text{ mm}$.

Кроме того, при изготовлении обмоток электрических машин применяются:

Фибра — прессованная масса из целлюлозы и красящих веществ (применяется для распорок и прокладок).

Гэтинакс — бумага, пропитанная бакелитовым лаком и спрессованная в виде нескольких слоев при значительном давлении и определенной температуре (применяется для распорок).

В качестве материалов для пропитки обмоток применяют асфальтовые лаки, представляющие собой асфальто-минеральную смолу, растворенную в скипидаре, афире, спирте или бензине, а также компаунды, т. е. смеси различных асфальтов с вазелином и канифолью.

Изготовление обмотки начинается с намотки секций. В случае больших сечений секций и малого числа секционных сторон в пазу, секции могут наматываться каждая отдельно. При большом числе сторон секций в пазу заготавливают сразу несколько секций на одном шаблоне.

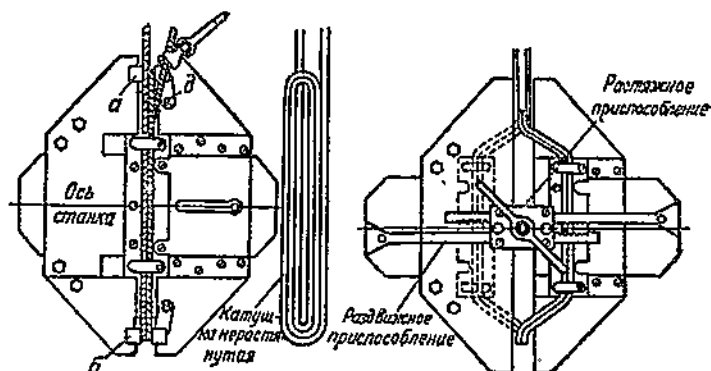


Рис. 76.

Намотка секций при изготовлении их из круглой изолированной проволоки производится на специальном намоточном приспособлении (рис. 76), которое представляет собой вырезанный железный лист, прикрепленный к вращающейся планшайбе. В листе с двух сторон сделаны прорезы, в которые вдвигаются кулачки. Последние делают подвижными и устанавливают на расстоянии, определяемом размерами секции. По железному листу может двигаться рамка, служащая для растяжки шаблона после его намотки. На рис. 76 показана секция до растяжки и (справа) в растянутом виде. К намоточному станку медь поступает с барабанов, число которых определяется числом одновременно наматываемых секций. Число оборотов станка должно соответствовать числу витков одной секции. После намотки перевязывают секции в ряде мест, чтобы относительное положение витков при растяжке было неизменным. После растяжки намотанные секции поступают в изолировку, которая производится вручную хлопчатобумажной лентой толщиной 0,15 мм в полнахлестки; затем опускают шаблон в ванну с лаком воздушной сушки для пропитки. Сушка производится на воздухе в течение 1—2 часов.

После сушки изолируют отдельно ту часть шаблона, которая будет уложена в пазы. Для изолировки наворачивают микафоллий 5—6 раз, при толщине листа его 0,1—0,15 мм. Ввиду хрупкости микафоллия часто разогревают его листы до размягчения, а затем уже производят наладку на шаблон.

После обертки микафоллием шаблоны обматывают хлопчатобумажной лентой вразбежку.

Далее идет процесс нагревания шаблона и опрессовки его в горячем состоянии. Последнее необходимо для испарения шеллака из микафоллия и скрепления отдельных листов его между собой в одну сплошную гильзу.

Готовый шаблон подвергается проверке его размеров для установления возможности укладки его в паз; затем проверяется соответствие начал и концов секций шаблона. Кроме того, каждая секция проверяется на обрыв, для чего к ней подводится ток через лампу накаливания. В случае обрыва лампа не загорается.

На рис. 77 показан готовый шаблон, состоящий из трех секций.

В случае стержневой обмотки, изготовляемой из голый меди прямоугольного сечения, нарезают медь на отдельные части, из которых затем выгибаются секции. Нарезанные стержни рихтуются т. е. их выпрямляют на железной плите деревянным молотком. После этого стержни загибают на ребро специальным загибочным приспособлением, и они получают вид, изображенный на рис. 78.



Рис. 78.

Концы стержней после загиба лудятся, а затем производятся остальные операции по загибу секции. На рис. 79 показан последовательный ход операций по загибу секции. На рис. 79, а изображен загиб лобовой части, на рис. 79, б — отгиб прямой части с одной из сторон, рис. 79, с дает вид загиба прямой части с другой стороны, рис. 79, д показывает отгиб лобовых частей со стороны коллектора.

Для получения законченной секции (рис. 80) остается затем произвести выгиб лобовых частей на деревянном шаблоне.

Изоляция секций производится миткалевой лентой шириной в 15 мм и толщиной 0,15 мм в полнахлестки. Намотка ленты может быть произведена вручную или на особом станке. Затем секции пропитываются лаком воздушной сушки, высушиваются и сдаются для намотки.

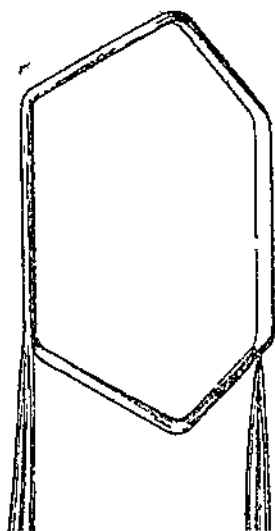


Рис. 77.

Готовые секции должны быть уложены на якорь машины. Последний предварительно осматривается, пазы его окрашива-

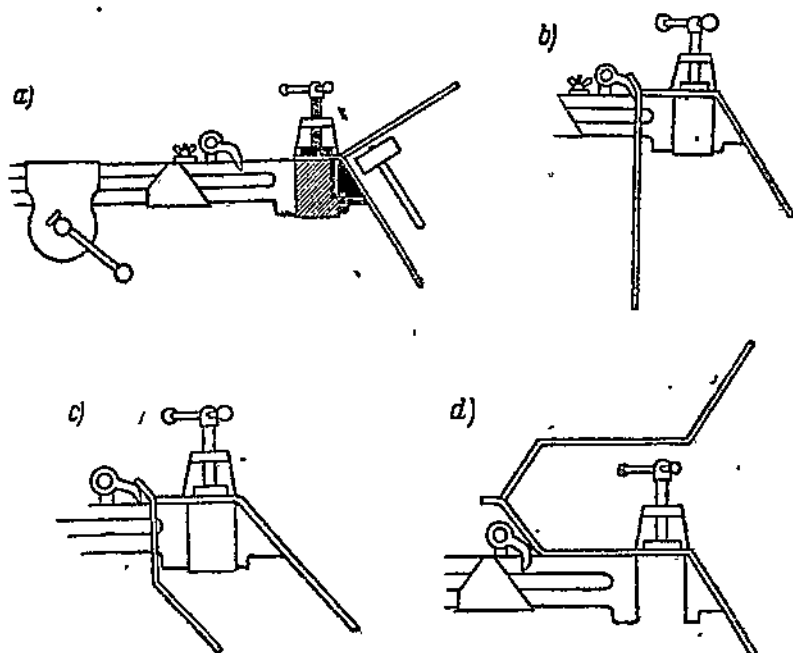


Рис. 79.

ются лаком, коллектор проверяется на отсутствие соединения между пластинами и соединения пластин с корпусом. Обмоткодержатели якоря должны быть предварительно изолированы. Отметим, что под обмоткодержателем понимают опорные кольца или поверхности, которые выполняются обычно в виде приливов к нажимным шайбам, скрепляющим железо якоря. Поверхность обмоткодержателей должна быть изолирована прессшпаном и хлопчатобумажной тканью. На рис. 81 и 82 изображен раз-

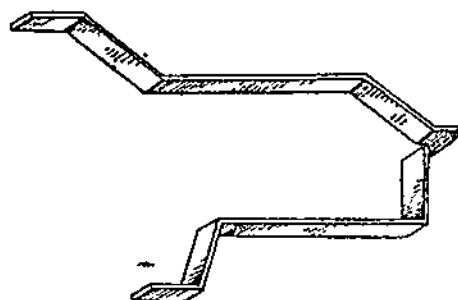


Рис. 80.

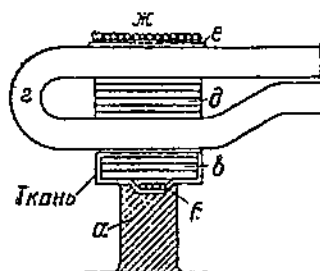


Рис. 81.

рез лобовых частей обмотки и обмоткодержателей. Рис. 81 дает обмоткодержатель со стороны якоря, противоположной коллек-

тору, рис 82 — обмоткодержатель со стороны коллектора. Здесь *а* — обмоткодержатель, *б* — шнур для крепления ткани, *в* — прессшпан, *г* — лобовая часть обмотки, *д* — ряд слоев прессшпана, *е* — прессшпан, проложенный под бандажом, *ж* — бандаж.

Укладка обмотки на якорь для шаблонов, изготовленных из проволоки круглого сечения, производится следующим образом.

В пазы якоря вставляют изоляционные коробки из прессшпана или латероида для предохранения обмотки от повреждения во время вкладки секций в пазы. Коробки должны выступать из паза на 20—25 мм с каждой стороны. После вкладки секций паз получает вид рис. 83. Толщина изоляционных коробок принимается в зависимости от размера паза.

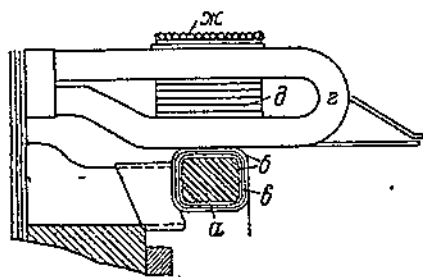


Рис. 82.

Для дальнейшей укладки секций в пазы необходимо знать шаги по зубцам и по коллектору (только эти шаги и задаются при практическом осуществлении обмотки). Пусть шаг $y_z = 9$ и $y_k = 58$, обмотка волновая. Принимая какой-либо из пазов за первый, отсчитываем от него 10-й паз в соответствии с заданным шагом по зубцам (пазам), находим между данными пазами средний зубец (очевидно в данном случае 5-й, так как между 1-м и 10-м пазами находится 9 зубцов) и отыскиваем коллекторную пластину, лежащую против середины этого сред-

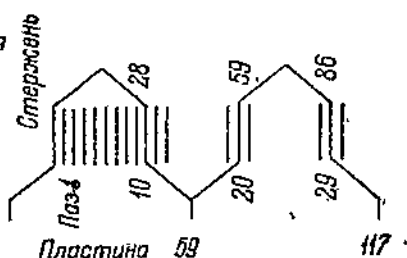
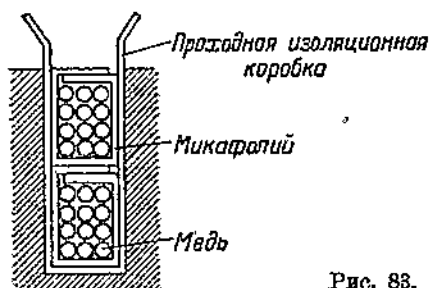


Рис. 83.

него зубца. От этой пластины отсчитываем влево $\frac{y_k}{2} = 29$ коллекторных пластин; найденную пластину считаем за № 1 и отсчитываем от нее вправо 59 пластин, считая и пластину № 1. Эти пластины соответствуют коллекторному шагу и должны быть отмечены керном. После разметки двух пластин и двух пазов можно приступить к укладке обмотки.

Для этого с 10-го паза и до 18-го включительно укладываем шаблоны вниз пазов, оставляя другую их сторону висеть над пазами с 1-го до 9-го. Всего закладываем таким образом 9 шаб-

лонов, после чего 10-й шаблон укладываем уже полностью в 19-й паз нижней стороной и в 10-й паз верхней. В дальнейшем продолжаем укладку следующих шаблонов полностью. Уложив все секции на якорь, располагаем наверху пазов оставшиеся еще неуложенными стороны первых 9 шаблонов. На рис. 84 показан якорь в стадии укладки обмотки; здесь хорошо видны верхние концы секций, висящие над пазами для пропуска нижних сторон.

Теперь необходимо присоединить концы секций к коллектору. Найдя начало и конец каждой секции с помощью лампочки (как это делали при определении исправности секции), вкладывают конец нижней стороны первой секции, расположенной в 10-м пазу, в вырез (шлиц) 59-й пластины коллектора. Концы двух других



Рис. 84.

секций, принадлежащих этому же шаблону, вкладывают в шлиц 60-й и соответственно 61-й пластины коллектора. Концы секций закладываются в шлицы пластин посредством тупой лопатки.

После укладки всех нижних сторон секций накладывают на эти стороны бандаж из хлопчатобумажной ленты в несколько рядов.

Далее укладывают в шлицы верхние концы секций, начиная с конца 1-й секции, помещаемого в шлиц 1-й пластины. Таким образом укладывают все секции верхнего ряда. При этом во избежание замыкания отдельных концов между собой необходимо их змеевидно переплести хлопчатобумажной лентой.

После присоединения всех концов секций к коллектору окончательно осаживают пазовые стороны шаблонов в пазу ударами ручника по фибровому или деревянному клину. Оставшееся наверху пазов место заполняется полосами прессшпана, после чего паз закрывается путем загиба сторон изоляционной коробки.

Если шаблоны изготовлены из медных стержней, то процесс вкладки их в пазы идет несколько иначе. В этом случае пазовая

изоляция должна быть значительно солиднее, так как секции не подвергаются предварительному изолированию опрессовкой миканитом. Процесс укладки стержней начинают с нижних сторон секций. После укладки этих сторон и наложения на них прессшпановых прокладок, в каждый паз укладывают верхние стороны. Стержни в пазах удерживаются помощью деревянных клиньев, сидящих в пазу в ласточкином хвосте (разрез паза с обмоткой — см. рис. 85).

После обмотки якорь испытывается высоким напряжением переменного тока на корпус.

Согласно данным ОСТ 3888 изоляция обмоток якорей должна выдерживать следующие напряжения: у машин мощностью до 1 kW — двойное номинальное напряжение + 500 V, но не ниже 1000 V, у машин мощностью выше 1 kW — двойное номинальное напряжение + 1000 V, но не ниже 1500 V.

Следующим процессом является наложение на якорь бандажей для закрепления обмотки, что выполняется на бандажировочном станке намоткой на соответствующие части якоря стальной проволоки. Бандажи накладываются как на лобовые части обмотки, так и на пазовую часть — в выточки, специально для этого сделанные на поверхности якоря (рис. 86).

После бандажировки необходимо припаять концы секций к коллектору оловом. Пайка производится паяльником. В целях предохранения меди коллектора и секций от разъедания при пайке применяют канифоль, а не кислоту.

Качество пайки проверяют измерением переходного сопротивления от коллекторной пластины к концу секции, а также пропусканием тока через якорь и наблюдением за равномерностью нагрева мест пайки.

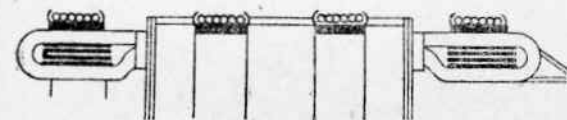


Рис. 86.

После запайки обмотки готовый якорь отправляют в печь для сушки в течение 4—8 часов при температуре 100—110° C. Делают это для удаления влаги из изоляционного материала якоря. Просушка может считаться законченной, если сопротивление изоляции достигает величины 10—20 мегомов. Измерения производятся меггером.

Для предохранения изоляции от отсырения якорь подвергают пропитке лаком, растворенным в бензине. Якорь погружают в бак с раствором лака и выдерживают в нем в течение 10—15 минут. После пропитки якорь вновь просушивают. Затем покрывают якорь из пульверизатора быстро высыхающим лаком воздушной сушки, дают остыть и затем промеряют сопротивление изоляции, которое должно быть не менее 60—80 мегомов.

Если машина предназначена для работы в сырых помещениях, процесс пропитки производится несколько раз.

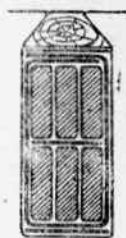


Рис. 85.

МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ И ЕЕ РАСЧЕТ.

1. Магнитная цепь и способы возбуждения.

Тот магнитный поток, который индуцирует электродвижущую силу в обмотке вращающегося якоря, создается в современных машинах при помощи электромагнитов, в поле которых якорь помещается. Чтобы создать наибольшую концентрацию магнит-

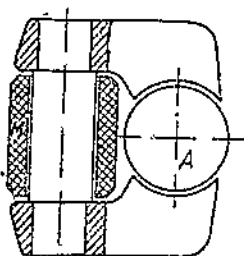


Рис. 87, а.

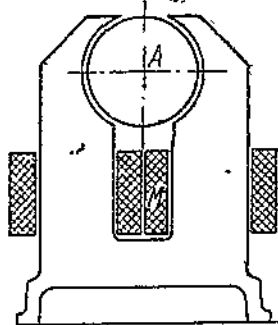


Рис. 87, б.

ного потока при вхождении в якорь для максимального использования потока и получения его при наименьшем количестве ампервитков обмотки возбуждения, придают контуру, проводящему магнитные линии поля (так называемой „магнитной цепи“),

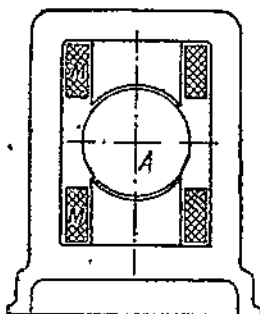


Рис. 87, в.

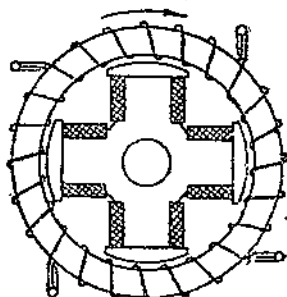


Рис. 87, д.

определенную форму. Эта форма со времени возникновения первых электрических машин претерпела ряд видоизменений.

Первоначальные электрические машины, обладая всего лишь одним электромагнитом возбуждения (двухполюсным), выполнялись в простейшей своей форме по рис. 87, а. Здесь *М* — катушка возбуждения, *А* — якорь машины. Конструкция этого рода обладает рядом недостатков, как-то: значительным рассеянием

магнитного потока, неравномерным его распределением в железе якоря, плохим охлаждением одной большой катушки возбуждения. Лучшими условиями в отношении охлаждения отличалась весьма распространенная в свое время конструкция рис. 87, *b*.

Типом магнитной системы, переходным к современным, является конструкция рис. 87, *c*, в которой благодаря помещению катушек на полюсных сердечниках вблизи якоря значительно уменьшено рассеяние. Обращает на себя внимание также ма-

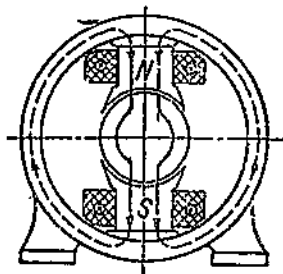


Рис. 87, *c*.

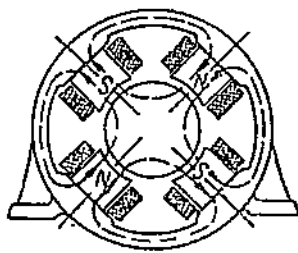


Рис. 87, *f*.

шина фирмы Сименс-Гальске (рис. 87, *d*) с неподвижными полюсами, расположенными внутри кольцевого якоря. Конструкция такого внешнего вращающегося якоря представляет значительные затруднения при ее осуществлении.

Переходя к современным типам машин, имеем на рис. 87, *e* магнитную цепь двухполюсной машины и на рис. 87, *f*—многополюсной. При наличии дополнительных полюсов, расположенных в нейтральных зонах, магнитная цепь получает вид рис. 88.

Для создания магнитного потока в любой из этих магнитных цепей необходимо, как говорят, возбудить машину, т. е. послать постоянный ток в проводники катушек полюсов.

В случае, если питание обмотки возбуждения производится от независимого источника тока, например от аккумуляторной батареи или другой машины постоянного тока, возбуждение называют независимым. Схема такой машины показана на рис. 89. Здесь *A, B*—зажимы якоря; *G, H*—зажимы обмотки добавочных полюсов; *D, C*—зажимы обмотки возбуждения, питаемой через реостат *NR* от особой цепи *pn*; *PN*—зажимы внешней цепи. Этот способ возбуждения применяется теперь лишь в случае необходимости регулировать напряжение в очень широких пределах или в случае, когда напряжение самой машины не может быть приложено к возбуждающей цепи вследствие неподходящего его значения (например, в высоковольтных машинах).

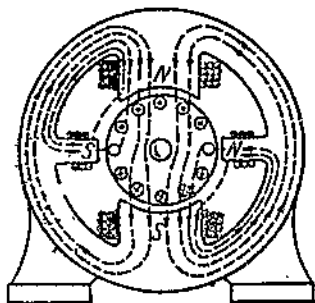


Рис. 88.

Другой тип возбуждения, называемый самовозбуждением, имеет преимущественное распространение. При самовозбуждении генератор питает свою цепь возбуждения током, вырабатываемым им же самим. Если катушки возбуждения включены последовательно со щетками и внешним сопротивлением (нагрузкой), питаемым машиной, то получается генератор последовательного возбуждения. Если же включить обмотку возбуждения параллельно якорю, то получается машина параллельного возбуждения или, как ее часто называют, шунтового возбуждения. Можно, наконец, применить две обмотки возбуждения, включив одну из них последовательно, а другую—параллельно; в таком случае получается машина смешанного возбуждения. Способ соединения обмотки возбуждения со щетками определяет рабочие свойства

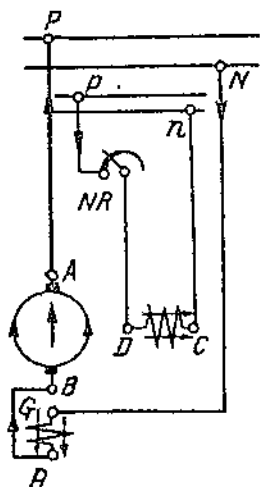


Рис. 89.

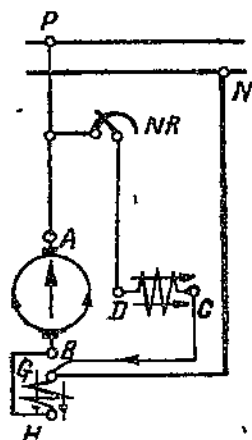


Рис. 90.

машины, создавая отдельные типы машин постоянного тока: с последовательным (серийным), параллельным (шунтовым) или смешанным (компаунд) возбуждением.

Машина с параллельным возбуждением имеет схему соединений по рис. 90. Здесь A, B —зажимы якоря; G, H —зажимы обмотки дополнительных полюсов, включенной последовательно с якорем и внешним сопротивлением (зажимы P, N), питаемым машиной; DC —зажимы обмотки возбуждения, включенной параллельно с внешним сопротивлением; NR —регулируемое сопротивление в цепи возбуждения. Возможность появления тока в цепи возбуждения основывается на наличии в магнитной системе любой машины некоторого числа магнитных линий остаточного поля, которое с прекращением тока в обмотке возбуждения не уничтожается. Электродвижущая сила, индуцированная в обмотке якоря при вращении его в этом поле, будет достаточно велика для того, чтобы послать в обмотку возбуждения слабый ток и усилить остаточное поле. Усиление поля поведет к уве-

личению э. д. с. обмотки якоря, возрастанию напряжения на зажимах и дальнейшему увеличению тока, что будет сопровождаться увеличением магнитного поля и новым нарастанием э. д. с. Эта последняя, так же как и ток возбуждения, не будет, однако, увеличиваться беспредельно. Установившееся значение э. д. с. получится тогда, когда ток, созданный ею в цепи возбуждения, даст поле, индуктирующее ту же э. д. с. Вполне понятно, что самовозбуждение может начаться лишь тогда, когда поле, создаваемое током, вызванным э. д. с. остаточного поля, будет усиливать это остаточное поле.

Ток цепи возбуждения, благодаря непосредственному ее включению на щетки, не зависит в шунтовой машине прямо от тока во внешней цепи машины. Ток внешней цепи машины влияет лишь косвенно на ток возбуждения, поскольку изменение внешнего тока вызывает изменение напряжения на зажимах машины. Ввиду этого сопротивление возбуждающего контура можно оставлять неизменным при всех изменениях сопротивления внешней цепи. Благодаря достаточному для практики постоянству напряжения, а также удобству его регулирования помощью изменения сопротивления реостата NR , данный тип генератора постоянного тока получил наибольшее распространение.

Наличие в обмотке возбуждения генератора последовательного возбуждения (сериес) (схема рис. 91) того же тока, что и во внешней цепи, ведет к увеличению напряжения на зажимах машины при уменьшении сопротивления этой цепи, т. е. при увеличении нагрузки машины. Ввиду резкого характера этого изменения, машины последовательного возбуждения применяются в качестве генераторов только при особых условиях.

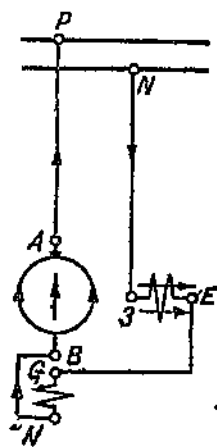


Рис. 91.

Третий тип — компаундный генератор смешанного возбуждения (компаунд) выполняется обычно так, что преобладающее значение имеет шунтовая обмотка возбуждения, последовательная же служит для поддержания возможно строгого постоянства напряжения при колебаниях нагрузки. В машине, снабженной одной лишь шунтовой обмоткой, это напряжение изменяется. Иногда, при необходимости поддерживать постоянство напряжения в конце длинного питаемого машиной фидера, последовательную обмотку рассчитывают так, чтобы напряжение машины возрастало при увеличении тока нагрузки на величину, необходимую для компенсации падения напряжения от этого тока в фидере. Схема компаунд-машины дана на рис. 92. Здесь DC — шунтовая обмотка возбуждения и FE — последовательная.

В соответствии с каждым типом генератора можно получить и двигатели: шунтовый, сериесный и компаундный.

Отметим, что у двигателей имеется всегда лишь независимое возбуждение, так как в них электрическая энергия преобра-

зается в механическую и ток, идущий в цепь возбуждения, поступает туда извне, а не вырабатывается самой машиной. Подразделение двигателей, одинаковое с генераторами, получилось вследствие аналогичного включения обмотки возбуждения по отношению к якорю машины — последовательного с якорем, параллельного ему (шунтом) или же комбинированного включения: одной обмотки последовательно, а другой параллельно (компаунд).

2. Магнитные материалы, применяемые в динамостроении.

Части магнитной цепи электрической машины состоят как из листового железа (например якорь и полюсные наконечники), так и из литой стали или чугуна (полюсные сердечники, ярмо). Особо важное значение имеет листовая электротехническая сталь как с точки зрения ее магнитных свойств — проницаемости, так и величины потерь в ней на гистерезис и токи Фуко.

Листовая электротехническая сталь изготавливается прокаткой болванок, полученных сименс-мартеновским процессом, и последующей термической обработкой их при температуре около 800°C . Наилучшими свойствами обладает сталь, полученная электролитическим путем, но она весьма дорога, ввиду чего применяют обычно прокатанную литую сталь. Необходимым требованием, предъявляемым к такой стали, является отсутствие примесей. Так, содержание в ней марганца должно быть не более $0,35\%$, серы и фосфора — не более $0,065\%$. При этих условиях

удается получить сталь достаточно прочную и обладающую хорошей магнитной проницаемостью. Обязательной является присадка кремния. При наличии всего $0,5\%$ кремния получается уменьшение потерь до величины порядка $3,6\text{ W/kg}$ при индукции в $10\,000\text{ G}$ и частоте в 50 Hz (нормальные условия испытания листовой стали), тогда как сталь без кремния имеет потери около 4 W/kg и обладает свойством старения, т. е. увеличения потерь с течением времени. Присадкой кремния в количестве 1% можно свести потери до 3 W/kg ; при 2% кремния имеем потери порядка $2,5\text{ W/kg}$ и, наконец, при $4,5\%$ кремния получаем потери в $1,7\text{--}1,8\text{ W/kg}$. Все данные относятся к листовой стали при толщине листов $0,5\text{ mm}$, нормально применяемой в динамостроении. В случае меньшей толщины (в $0,35\text{ mm}$), применяемой в трансформаторах и особо ответственных машинах, потери уменьшаются ввиду большего сопротивления путей для паразитных токов и доходят до $1,1\text{--}1,3\text{ W/kg}$.

Согласно существующим в СССР нормам на листовую электротехническую сталь (ОСТ 6891), устанавливаются следующие марки стали (для вращающихся электрических машин).

Марки стали	Рекомендуемое применение
ЕС 1	Для электрических моторов и генераторов в магнитных цепях, питаемых постоянным током, или в слабо нагруженных магнитных полях переменного тока
ЕС 1 А	Для нормальных (каталожных) электрических моторов и генераторов
ЕС 1 АА	Для электрических моторов и генераторов специального назначения
ЕС 2 А	Для магнето
ЕС 3 А	Для слаботочной и радиоаппаратуры; турбогенераторов мощностью меньше 1000 kW и машин специального назначения
ЕС 4	Для трансформаторов звонковых, слаботочных, котельных, сварочных, турбогенераторов мощностью до 10 kW и синхронных машин мощностью до 5000 kW.

Сталь марки ЕС 1 изготовляется толщиной в 0,5 mm при размерах листов 2000 × 1000 mm и 1500 × 750 mm.

Сталь марки ЕС 1 А имеет толщину как 1 mm (листы 1500 × 750 mm), так и 0,5 mm (листы как ЕС 1).

Стали ЕС 1 АА и ЕС 2 А имеют толщину 0,5 mm при размерах листов как ЕС 1.

Сталь ЕС 3 А, помимо листов той же толщины (0,5 mm) и размеров, что и ЕС 1, имеет еще листы в 0,35 mm толщиной при размерах листа 1500 × 750 mm.

Сталь ЕС 4 изготовляется толщиной как 0,5 mm (размеры листов 2000 × 1000 mm и 1500 × 750 mm), так и 0,35 mm (размеры листов 2000 × 1000 mm, 2000 × 750 mm и 1500 × 750 mm).

Данные магнитной индукции листовых электротехнической стали для определенных значений намагничивающих ампер-витков на 1 см должны быть не менее указанных в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3.

Марки стали	Толщина листа mm	Магнитная индукция в гауссах при ампер-витках на 1 см			
		25	50	100	300
ЕС 1 А	1,0	По соглашению между потребителем и поставщиком			
ЕС 1 А	0,5	15 100	18 400	17 700	19 900
ЕС 1	0,5	15 000	16 800	17 500	19 700
ЕС 1 АА	0,5	14 700	15 800	17 000	19 200
ЕС 2 А	0,5	14 600	15 700	16 800	19 000
ЕС 3 А	0,5	14 500	15 600	16 700	18 900
ЕС 3 А	0,35	14 500	15 600	16 700	18 900
ЕС 4	0,5	14 400	15 500	16 600	18 700
ЕС 4	0,35	14 400	15 500	16 600	18 700

От указанных в этой таблице значений магнитной индукции допускаются отклонения в сторону уменьшения не более, чем на 50 гаусс.

Что касается потерь на гистерезис и на токи Фуко, то последние, измеренные при максимальной индукции $B=10\,000\text{ Г}$ и $B=15\,000\text{ Г}$ при частоте тока в 50 Гц и при синусоидальной форме кривой приложенного напряжения, не должны превышать следующих величин:

ТАБЛИЦА 4.

Марки сталей	Т о л щ и н а л и с т а :					
	1 mm		0,5 mm		0,35 mm	
	V_{10}	V_{15}	V_{10}	V_{15}	V_{10}	V_{15}
ЕС 1	Устанавливается по соглашению между потребителем и поставщиком		3,6 W на 1 kg	8,6 W на 1 kg	—	—
ЕС 1 А			3,3 " " 1 "	7,9 " " 1 "	—	—
ЕС 1 АА			2,85 " " 1 "	7,0 " " 1 "	—	—
ЕС 2 А			2,6 " " 1 "	6,4 " " 1 "	—	—
ЕС 3 А			2,3 " " 1 "	5,6 " " 1 "	2,0 W на 1 kg	4,2 W на 1 kg
ЕС 4			1,8 " " 1 "	3,9 " " 1 "	1,45 " " 1 "	3,4 " " 1 "

Примечание. Потери энергии на гистерезис и токи Фуко в ваттах на 1 kg стали называются удельными потерями и обозначаются символом V с индексом 10 и 15: V_{10} и V_{15} . При этом V_{10} обозначает удельную потерю при максимальной индукции $B=10\,000\text{ Г}$ и V_{15} обозначает удельную потерю при максимальной индукции $B=15\,000\text{ Г}$.

Литая сталь, применяемая в динамостроении, представляет собой железо с весьма малым содержанием углерода. По магнитным свойствам эта сталь близка к листовой динамной стали марки ЕС 1 А.

Литой чугун может обладать весьма различной проницаемостью. Обычно чугун применяют в виде серого чугуна, полученного путем медленного охлаждения отливки. Употребляют его для станин, подшипников и небольших поддерживающих частей, как, например, траверз. При небольших скоростях вращения якорей чугун может применяться также для ступиц якоря. В случае применения чугуна для ярма в нем допускают индукции порядка 7500—9000 Г, чему соответствует 40—70 ампервитков на 1 см пути.

3. Обоснования расчета магнитной цепи.

От данных общего характера о формах магнитной цепи, способах создания магнитного потока в этой цепи и магнитных материалах надлежит перейти к более подробному рассмотрению

отдельных частей магнитной цепи, а также выяснению вопроса о целесообразных размерах отдельных частей этой цепи и о том, каким числом ампервитков должна обладать обмотка возбуждения для создания в магнитной цепи необходимого потока.

Рассматривая магнитную цепь современной машины постоянного тока, можем установить, прежде всего, некоторый средний путь магнитной линии потока. Как видно из рис. 93, число замкнутых контуров потока получается равным числу полюсов машины $2p$; все контуры имеют одинаковую форму, вследствие чего представляется возможным рассмотреть лишь один из них. При этом, ввиду разветвления потока каждого полюса на две части, приходится считаться с наличием в контуре потока $\Phi_a/2$, где Φ_a — поток, вступающий в якорь из полюса.

Выражение для потока каждого замкнутого контура магнитных линий может быть написано, согласно закону магнитной цепи, в виде:

$$\frac{\Phi_a}{2} = \frac{0,4 \pi i_e w_e}{\sum \frac{L}{\mu Q}}, \quad (31)$$

где: w_e — число витков двух катушек возбуждения, i_e — ток в тех же катушках в амперах, L — длина пути потока в сантиметрах, μ — магнитная проницаемость, Q — сечение, перпендикулярное к линиям потока, в квадратных сантиметрах.

Ввиду того, что магнитная цепь машины состоит из отдельных участков различного сечения, обладающих, кроме того, различной проницаемостью, приходится сумму, стоящую в знаменателе выражения (31), представить в виде пяти слагаемых. Участками магнитной цепи являются: сердечник якоря, слой зубцов и впадин, междужелезное пространство, сердечник полюса с наконечником и ярмо. Присваивая каждой из букв, входящих в знаменатель ф-лы (31), соответствующий индекс: a — для якоря, z — для зубцов, δ — для междужелезного пространства, m — для полюса и j — для ярма (станины), получим:

$$\frac{\Phi_a}{2} = \frac{0,4 \pi i_e w_e}{\frac{L_a}{\mu_a Q_a} + 2 \frac{L_z}{\mu_z \frac{Q_z}{2}} + 2 \frac{L_\delta}{\mu_\delta \frac{Q_\delta}{2}} + 2 \frac{L_m}{\mu_m \frac{Q_m}{2}} + \frac{L_j}{\mu_j Q_j}}. \quad (32)$$

Ввиду того, однако, что в якорь вступает только часть создаваемого полюсами магнитного потока, остальная же часть его рассеивается, можно сказать, что в полюсах и ярме поток будет больше на некоторую величину s . Для учета этого увеличения поля можно предположить, что магнитное сопротивление пути

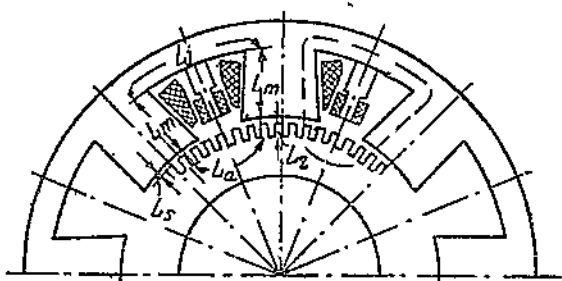


Рис. 93.

потока по полюсам и ядру будет больше на величину $1 + s = \sigma$, что потребует для восстановления необходимого потока в якоре увеличения ампервитков обмотки возбуждения. В соответствии с этим получим:

$$\Phi_a = \frac{0,4\pi i_a w_e}{\frac{L_a}{2\mu_a Q_a} + 2\frac{L_z}{\mu_z Q_z} + 2\frac{L_s}{\mu_s Q_s} + 2\frac{L_m \sigma}{\mu_m Q_m} + \frac{L_f \sigma}{2\mu_f Q_f}} \quad (33)$$

или

$$i_a w_e = \frac{1}{0,4\pi} \left(\Phi_a \frac{L_a}{\mu_a Q_a} + \Phi_a \frac{2L_z}{\mu_z Q_z} + \Phi_a \frac{2L_s}{\mu_s Q_s} + \Phi_a \sigma \frac{2L_m}{\mu_m Q_m} + \frac{\Phi_a}{2} \sigma \frac{L_f}{\mu_f Q_f} \right). \quad (34)$$

Ввиду того, что левая часть этого выражения представляет собой произведение силы тока на число витков, т. е. ампервитки, каждый из членов правой части также представляет собой ампервитки, необходимые для проведения потока через данную часть магнитной цепи. Принимая $\mu_s = 1$ (воздух) и зная, что:

$$\frac{\Phi_a}{Q_x} = B_x,$$

где B_x — индукция в соответствующей части магнитной цепи, можем написать:

$$i_a w_e = 0,8 B_a \frac{L_a}{\mu_a} + 0,8 B_z \frac{2L_z}{\mu_z} + 1,6 B_s L_s + 0,8 B_m \frac{2L_m}{\mu_m} + 0,8 B_f \frac{L_f}{\mu_f}. \quad (35)$$

Обозначив каждое из слагаемых через AW с соответствующим индексом. Тогда:

$$AW_i = AW_a + AW_z + AW_s + AW_m + AW_f. \quad (36)$$

Ампервитки каждой части магнитной цепи могут быть представлены так:

$$AW_x = aw_x L_x, \quad (37)$$

где aw_x — ампервитки, необходимые для проведения потока на единицу (1 см) длины его пути.

$$aw_x = 0,8 \frac{B_x}{H_x} = 0,8 H_x^{-1}. \quad (38)$$

Здесь H_x — сила поля в x -ой части цепи и может быть найдена по кривой намагничивания того материала, из которого изготовлена данная часть магнитной цепи. На рис. 94 даны такие кривые для трех различных материалов, причем по оси абсцисс отложены непосредственно ампервитки.

В соответствии с принятыми обозначениями можно переписать выражение (36) в виде:

$$AW_i = aw_a L_a + aw_z 2L_z + 1,6 B_s L_s + aw_m 2L_m + aw_f L_f; \quad (39)$$

причем для междужелезного пространства обозначения aw не введено ввиду того, что $\mu_s = 1$. ΔW_t представляет собой ампервитки, необходимые для двух катушек полюсов. Очевидно, что полные ампервитки на всю машину:

$$\Delta W_t = \Delta W_{ap}. \quad (40)$$

Поэтому можно установить следующий порядок расчета магнитной цепи машины.

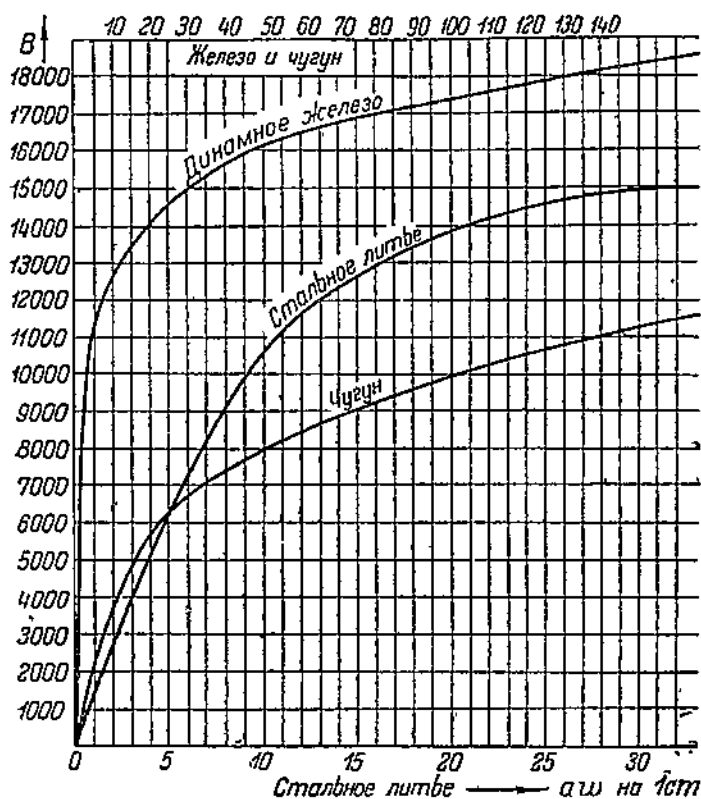


Рис. 94.

Исходным пунктом является ф-ла (26) для э. д. с. машины:

$$E_a = \frac{p}{\Phi_0} \Phi_a \frac{N}{a} 10^{-8} \text{ вольт.}$$

Определив из этой ф-лы Φ_a , необходимо найти индукции в различных частях магнитной цепи. Величину индукций выбирают, исходя из различных соображений, как-то: допустимых потерь в якоре и зубцах, нормального насыщения машины и т. д. Зная индукции и потоки, можем определить сечения различных частей магнитной цепи. Линейные размеры этих частей устанавливаются из соображений конструктивного порядка.

Вычертив, затем, эскиз магнитной цепи машины подобно рис. 93, можно определить средние длины пути потока, а по кривым рис. 94 — найти удельные ампервитки aw , после чего легко определить ампервитки AW для каждой части. Отметим, однако, что ампервитки aw легко определяются лишь для тех частей, где магнитный поток распределен равномерно, в других же частях, где этой равномерности нет, подсчет осложняется. Кроме того, для вычисления индукции, а следовательно, и ампервитков для полюсов и ярма, нужно знать величину σ , учитывающую рассеяние потока (так называемый „коэффициент рассеяния“). Все это осложняет расчет магнитной цепи и заставляет рассматривать каждую ее часть отдельно.

4. Определение ампервитков для проведения потока через отдельные части магнитной цепи.

а) Определение ампервитков для сердечника якоря. Железо якоря машины постоянного тока может быть разделено на две части — сердечник и зубцы, расчет которых приходится производить отдельно вследствие изменения в сечении и различных допустимых значений индукции.

Сечение сердечника якоря, согласно рис. 95, будет:

$$Q_a = h_a l_a k_2,$$

где: h_a — высота железа, l_a — длина железных пакетов (см. рис. 100, а), k_2 — коэффициент, учитывающий изоляцию между отдельными листами железа сердечника якоря; обычно

принимают для оклеенного железа $k_2 = 0,9$, для лакированного железа $k_2 = 0,93$.

Магнитная индукция в яcore:

$$B_a = \frac{\Phi_a}{2Q_a} = \frac{\Phi_a}{2h_a l_a k_2}. \quad (41)$$

При расчете индукции принята во внимание лишь половина потока полюса, так как поток этот, входя в якорь, разветвляется на две части. По найденной индукции определяем ампервитки для проведения потока на 1 см длины якоря, а затем и полные:

$$AW_a = aw_a L_a. \quad (42)$$

Практически, при расчете электрической машины, задаются значением индукции в яcore, исходя из допустимой величины потерь в нем на гистерезис и токи Фуко, а затем уже определяют необходимое сечение.

Отметим, что распределение магнитных линий в якоре не будет вполне равномерным и поток будет сгущен в той части сердечника, которая лежит ближе к основанию зубцов. Поэтому, принимая распределение потока равномерным, мы вносим некоторую погрешность в вычисления, преуменьшая ампервитки aw_a . Последнее, впрочем, не имеет особого значения, ввиду относительно малой величины aw_a по сравнению с ампервитками других частей магнитной цепи.

б) Определение ампервитков для полюсов и ярма. Как было уже указано, магнитный поток в полюсах и ярме должен иметь значения большие, чем в якоре, ввиду рассеяния, которое имеет место между отдельными полюсами разной полярности. Картина распределения магнитного потока дана на рис. 96 для двух полюсов многополюсной машины. Как видно, часть линий замыкается в промежутке между полюсами непосредственно от полюса к полюсу, некоторые же линии замыкаются от полюса к ярму.

Для учета этого рассеяния необходимо выбрать соответствующий коэффициент:

$$\sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi_a} = \frac{\Phi_a + \Phi_s}{\Phi_a} = 1 + s, \quad (43)$$

где Φ_s — поток рассеяния.

Точный подсчет потока Φ_s может быть произведен в том случае, если известна картина распределения потока не только в главной магнитной цепи, но и в пространстве, окружающем эту цепь.

Поскольку построение такой картины весьма затруднительно, то ограничиваются, обычно, подсчетом отдельных частей поля рассеивания, имеющих наибольшую величину. К таким основным составляющим поля рассеивания принадлежат:

1) поток Φ_{s1} между обращенными друг к другу поверхностями полюсных наконечников;

2) поток Φ_{s2} между торцевыми поверхностями полюсных наконечников;

3) поток Φ_{s3} между обращенными друг к другу внутренними поверхностями сердечников полюсов;

4) поток Φ_{s4} между торцевыми поверхностями сердечников полюсов;

5) поток Φ_{s5} между внутренними поверхностями сердечников полюсов и ярмом;

6) поток Φ_{s6} между торцевыми поверхностями сердечников полюсов и ярмом.

Каждый из указанных шести потоков может быть определен обычным путем по формуле для магнитной цепи, если известна разность магнитных потенциалов, обуславливающая данный поток и магнитное сопротивление, лежащее на пути потока.

1. Поток Φ_{s1} между обращенными друг к другу поверхностями полюсных наконечников обусловлен той разностью магнитных потенциалов, которая необходима для проведения

основного потока через воздушный зазор, зубцы и сердечник якоря, так как поток Φ_{s1} и главный поток, проходящий через указанные части машины, включены параллельно.

Магнитодвижущая сила будет:

$$МДС_1 = 0,4\pi (AW_z + AW_z + AW_a).$$

Магнитное сопротивление:

$$R_1 = \frac{L_1}{a_1 l_p},$$

где: L_1 — длина средней линии рассеивания (см. рис. 96), a_1 — высота трубки, ограничивающей данный поток, l_p — длина полюсного наконечника в направлении оси машины.

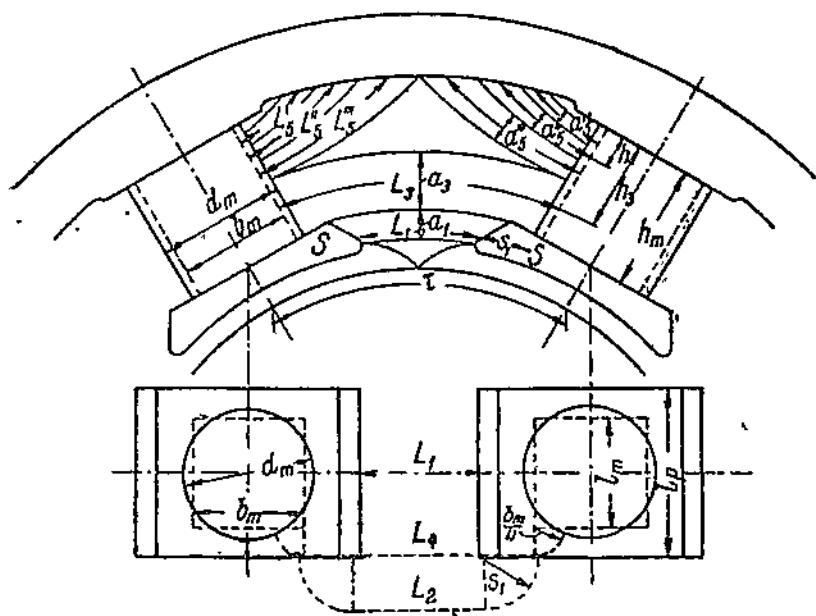


Рис. 96.

Магнитный поток:

$$\Phi_{s1} = 1,25 \frac{a_1 l_p}{L_1} (AW_z + AW_z + AW_a). \quad (44)$$

2. Поток Φ_{s2} между торцевыми поверхностями полюсных наконечников обусловлен той же магнитодвижущей силой. Магнитное сопротивление для этого потока R_2 можно найти, если известна торцевая поверхность (S_p) полюсного наконечника, а также средняя длина линии потока рассеивания. Можно доказать, что эта линия проходит через центр тяжести половины поверхности полюсного наконечника (точка S рис. 96) и имеет длину:

$$L_2 = L_1 + \pi s_1$$

(s_1 — см. рис. 96).

Поток:

$$\Phi_{s2} = 1,25 \frac{S_p}{L_2} (AW_3 + AW_z + AW_a). \quad (45)$$

3. Для определения Φ_{s3} — потока между внутренними поверхностями сердечников полюсов — чертим, предварительно, приблизительную картину распределения магнитного потока между полюсами и ярмом. При этом принимаем, что все линии, для которых расстояние между полюсом и ярмом (L_5) меньше, чем половина расстояния между полюсами ($1/2 L_3$), т. е.

$$\frac{1}{2} L_3 > L_5,$$

замыкаются к ярму.

В результате построения такой картины (при построении рисуем линии выходящими из полюсов перпендикулярно к их поверхности и замыкающимися, затем, по кратчайшим путям) находим ту высоту (a_3), на которой линии рассеивания замыкаются между полюсами.

Принимая, далее, линейный закон изменения м. д. с. по высоте полюса, можем написать выражение для потока:

$$\Phi_{s3} = 1,25 \frac{a_3 l_m}{L_3} (AW_3 + AW_z + AW_a) \frac{h_3}{h_m}, \quad (46)$$

где: h_3 — расстояние средней силовой линии от основания полюса, h_m — высота всего сердечника.

4. Поток Φ_{s4} между торцевыми поверхностями сердечников полюсов может быть принят распространяющимся по высоте a_3 так же, как и предыдущий. Длина средней линии потока будет:

$$L_4 = L_3 + \frac{b_m}{4} \pi,$$

где b_m — ширина полюсного сердечника.

Поток с одной торцевой поверхности:

$$\Phi_{s4} = 1,25 \frac{a_3 b_m}{L_4} (AW_3 + AW_z + AW_a) \frac{h_3}{h_m}. \quad (47)$$

5. Поток Φ_{s5} между внутренними поверхностями полюсных сердечников и ярмом отличается значительной неравномерностью. Объясняется это тем, что магнитодвижущая сила падает при подходе к основанию полюса, а также тем, что длина отдельных магнитных линий резко сокращается. Весь этот поток приходится, поэтому, разбивать на отдельные части, заключенные каждая в свою силовую трубку. Таких трубок принято, например, на рис. 96 по три с каждой внутренней поверхности полюса.

Поток каждой трубки будет:

$$\Delta \Phi_{s5} = 1,25 \frac{a_{sx} l_m}{L_{sx}} \cdot \frac{AW_3 + AW_a + AW_z}{2} \cdot \frac{h_{sx}}{h_m},$$

где: a_{sx} — высота трубки в среднем сечении, L_{sx} — средняя длина трубки между полюсом и ярмом, h_{sx} — расстояние средней линии трубки от основания полюса.

Полный поток с одной внутренней поверхности:

$$\Phi_{s5} = 1,25 \frac{l_m}{h_m} \cdot \frac{AW_s + AW_a + AW_z}{2} \sum \frac{a_{sx} h_{sx}}{L_{sx}}. \quad (48)$$

6. Поток Φ_{s5} между торцевыми поверхностями сердечников полюсов и ярмом может быть легко определен, если принять, что силовые линии между полюсом и ярмом на торцевой поверхности идут по дугам окружностей, описанных из точек соприкосновения полюса и ярма согласно рис. 97. Эти линии принимают выходящими из полюса на высоте, соответствующей высоте ярма h_j , а не на высоте $h_m - a_s$ (рис. 96), как это следовало бы из сказанного при определении потока Φ_{s3} . Этим учитывается некоторое увеличение потока, вызванное тем обстоятельством, что на самом деле силовые линии идут к ярму по несколько более коротким путям, чем окружности круга.

Для элементарной трубки шириной dx , отстоящей от стыка ярма и полюса на расстоянии x , имеем поток:

$$\Delta\Phi_{s5} = 1,25 \frac{b_m dx}{\pi x} \cdot \frac{AW_s + AW_z + AW_a}{2} \cdot \frac{x}{h_m}.$$

Рис. 97.

Полный поток между ярмом и торцевой поверхностью полюса будет:

$$\Phi_{s5} = \int_{x=0}^{x=h_j} \Delta\Phi_{s5} = 1,25 \frac{b_m h_j}{\pi h_m} \cdot \frac{AW_s + AW_z + AW_a}{2}. \quad (49)$$

Полный поток рассеивания на пару полюсов:

$$\Phi_s = 2(\Phi_{s1} + \Phi_{s2} + \Phi_{s3} + \Phi_{s4} + \Phi_{s5} + \Phi_{s6}). \quad (50)$$

Подсчет величины σ на основании теоретической картины распределения линий рассеивания довольно сложен. Ввиду этого при предварительных расчетах машины можно пользоваться полуэмпирической формулой проф. Ossapp'a:

$$\sigma = 1 + \left(4,5 \frac{p}{D} + \frac{2}{l}\right) \delta, \quad (51)$$

где: p — число пар полюсов, D — диаметр якоря в сантиметрах, l — длина якоря в сантиметрах, δ — длина между железного пространства в сантиметрах.

Пример. Пусть $\delta = 0,5$ см, $p = 3$, $D = 66$ см, $l = 31$ см; тогда $\sigma = 1 + \left(4,5 \frac{3}{66} + \frac{2}{31}\right) 0,5 = 1 + 0,135 = 1,135$.

Значение коэффициента рассеяния позволяет определить поток полюсов и ярма:

$$\Phi_m = \Phi_{a^c},$$

после чего, задаваясь индукцией, значение которой выбирается в зависимости от материала ярма и полюсов, можно определить сечение полюса:

$$Q_m = \frac{\Phi_{a^c}}{B_m} \quad (52)$$

и ярма

$$Q_j = \frac{\Phi_{a^c}}{2B_j}. \quad (53)$$

Сечение полюса, при круглых полюсах, может быть выражено также через его диаметр d_m :

$$Q_m = \frac{\pi d_m^2}{4}. \quad (54)$$

При полюсах прямоугольного сечения имеем:

$$Q_m = b_m l_m, \quad (55)$$

где: b_m — ширина полюса и l_m — длина его (в направлении оси машины).

Сечение ярма:

$$Q_j = h_j b_j, \quad (56)$$

где: h_j — высота ярма и b_j — ширина его.

Что же касается ампервитков, то, имея B_m и B_j , нетрудно найти aw_m и aw_j , после чего определяется:

$$AW_m = aw_m 2L_m, \quad (57)$$

а также:

$$AW_j = aw_j L_j. \quad (58)$$

с) Определение ампервитков для междужелезного пространства. Первое затруднение, с которым придется встречаться при расчете ампервитков, необходимых для проведения потока через междужелезное пространство, заключается в том, что поток между полюсным наконечником и якорем распределен не равномерно. Индукция, будучи почти постоянной под полюсным сердечником, резко падает до нуля у его краев в нейтральной зоне между полюсами. Поэтому прежде всего необходимо определить индукцию $B\delta$, входящую в формулу ампервитков:

$$AW_s = 1,6 B_s L_s.$$

Полная величина магнитного потока, выходящего из полюса и попадающего через междужелезное пространство в якорь, может быть рассчитана путем определения индукции в каждой точке, нанесения этих индукций в виде кривой по длине полюсного деления якоря, планиметрирования кривой и умножения на длину междужелезного пространства l_1 в направлении

оси машины. Действительно, магнитный поток может быть выражен следующим образом:

$$\Phi_a = l_1 \int_{x=0}^{x=\tau} B_{ax} dx. \quad (59)$$

На рис. 98 показана кривая поля; ее максимальная ордината будет B_s .

Имея кривую поля и величину B_s , не представляет затруднения после планиметрирования площади кривой найти ту теоретическую длину полюсной дуги b' , на которой поток должен был бы выходить из полюса, чтобы индукция оставалась неизменной и равной наибольшей ее величине. Строим для этого равновеликий по площади прямоугольник $abcd$ (рис. 98) с высотой B_s ; его основание будет b' .

Обозначив отношение:

$$\frac{b'}{\tau} = a_1,$$

имеем для нормальных машин $a_1 = 0,65 - 0,75$, причем при наличии в машине дополнительных полюсов берут a_1 ближе

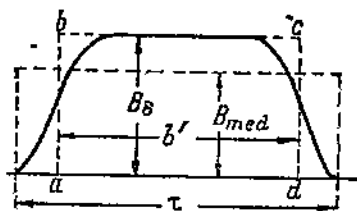


Рис. 98.

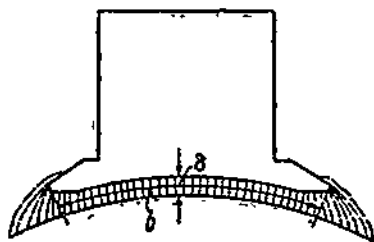


Рис. 99.

к нижнему пределу. Обычно при расчете машин задаются величиной a_1 , исходя из указанных пределов. В случае необходимости точного вычисления b' строят картину поля способом, указанным ниже. Часто, если известна (рис. 99) длина дуги полюсного наконечника b , прямо принимают:

$$b' = b + 2\delta.$$

Так как поток Φ_a обычно известен, можно, зная величину b' и l_1 , вычислить индукцию в междужелезном пространстве:

$$B_s = \frac{\Phi_a}{b' l_1}. \quad (60)$$

При этом величина l_1 не может быть принята равной длине якоря l , так как магнитные линии не проходят через вентиляционные каналы, а распределяются, как показано на рис. 100, а. На этом рисунке показан разрез полюса и пакетов якорного железа в осевом направлении с указанием пути линий между полюсом и якорем. Получается как бы некоторая потеря длины, след-

ствие наличия вентиляционных каналов. Эта потеря может быть определена по формуле:

$$l_1 = l - n_s b'_s \quad (61)$$

где n_s — число вентиляционных каналов, а b'_s — потеря длины машины вследствие наличия канала.

Эта последняя величина может быть взята из кривой рис. 100, б, построенной на основании значений b'_s , полученных из картин магнитного потока в канале. Кривая дана для канала шириной 10 мм.

Кроме величины B_s , необходимо определить для подсчета AW_s длину пути магнитных линий в междужелезном пространстве.

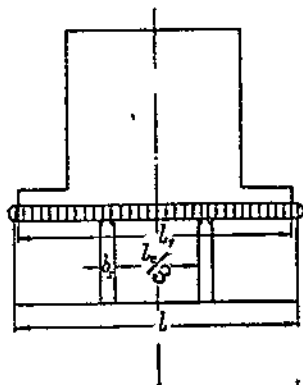


Рис. 100, а.

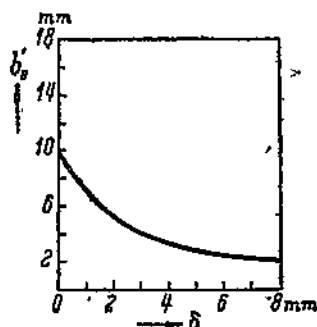


Рис. 100, б.

Эта длина не может быть принята для зубчатых якорей равной длине междужелезного пространства $[L_s \neq \delta]$, так как неодинаковая проводимость зубцов и впадин вызывает у поверхности зубцов сгущение линий, увеличивающее длину пути линий в междужелезном пространстве. Так же влияют и вентиляционные каналы, сгущающие магнитные линии в осевом направлении. Это увеличение может быть учтено путем введения эквивалентного зазора, увеличенного по сравнению с действительной его величиной. Учет влияния зубчатости якоря производят обычно путем введения коэффициента Картера (Carter) K_c :

$$L_s = K_c \delta, \quad (62)$$

где $K_c = K'_c \cdot K''_c$, причем: K'_c учитывает увеличение длины пути магнитных линий в воздушном зазоре, вызванное зубчатым строением якоря, K''_c учитывает увеличение длины линий вследствие вентиляционных каналов.

В случае гладкого якоря имеем магнитную проводимость воздушного зазора, рассчитанную на одно зубцовое деление t_1 (зубцовое деление — длина дуги якоря, приходящаяся на один зубец и впадину):

$$\lambda_s = \frac{1}{\delta/t_1} = \frac{t_1}{\delta}.$$

Для зубчатого якоря проводимость λ'_s может быть получена на основании построения картины магнитного потока. Имеем ряд силовых трубок, каждая длиной δ_x , вообще говоря, большей длины δ , и шириной b_x (рис. 101, а).

Проводимость для потока в воздушном зазоре определится тогда как сумма проводимостей отдельных трубок:

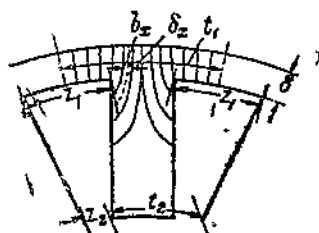


Рис. 101, а.

$$\lambda'_s = \sum \frac{b_x l_1}{\delta_x}.$$

Коэффициент, учитывающий уменьшение проводимости вследствие зубчатого строения якоря, будет:

$$K'_o = \frac{\lambda_s}{\lambda'_s} = \frac{t_1}{\delta \sum \frac{b_x}{\delta_x}}. \quad (63)$$

Ввиду значительных трудностей, связанных с построением картины магнитного потока в воздушном зазоре, желательно иметь аналитическую формулу для расчета K'_o . Получение такой формулы точным аналитическим путем на основании картины поля рис. 101, а невозможно — приходится прибегать к значительным упрощениям, в результате которых, пользуясь методом конформных преобразований, можно получить следующую формулу:

$$K'_o = \frac{t_1}{t_1 - \delta \left\{ \frac{4}{\pi} \left[\frac{m}{2\delta} \arctg \frac{m}{2\delta} + \ln \frac{\delta}{\sqrt{\frac{m^2}{4} + \delta^2}} \right] \right\}}, \quad (64)$$

где m — ширина впадины якоря.

Обозначив величину:

$$\frac{4}{\pi} \left[\frac{m}{2\delta} \arctg \frac{m}{2\delta} + \ln \frac{\delta}{\sqrt{\frac{m^2}{4} + \delta^2}} \right] = \gamma',$$

имеем:

$$K'_o = \frac{t_1}{t_1 - \delta \gamma'}. \quad (65)$$

Для определения γ' проще всего пользоваться формулой Рихтера, который заметил, что для $\frac{m}{\delta}$, лежащих в пределах:

$$1 < \frac{m}{\delta} < \infty,$$

можно положить:

$$\gamma' = \frac{\left(\frac{m}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{m}{\delta}}. \quad (66)$$

Для определения коэффициента K_c'' ход рассуждений остается точно таким же, как и для K_c' ; имеем:

$$K_c'' = \frac{\frac{l_e}{n_s + 1} + b_s}{\frac{l_e}{n_s + 1} + b_s - \gamma'' \delta}, \quad (67)$$

причем здесь, вместо зубцового деления t_1 , вошло осевое деление якоря, соответствующее одному пакету железа ($\frac{l_e}{n_s + 1} + b_s$), и новый коэффициент γ'' , зависящий от δ и ширины канала b_s . Эта зависимость, подобно γ' , будет:

$$\gamma'' = \frac{\left(\frac{b_s}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_s}{\delta}}. \quad (68)$$

Нахождение всех факторов, влияющих на коэффициент Картера, дает возможность определить его и найти выражение для ампервитков воздушного зазора:

$$AW_z = 1,6 B_z K_c' \delta, \quad (69)$$

или, в виде, более удобном для вычисления:

$$AW_z = 1,6 \frac{\Phi_a}{a_1 t_1} K_c' \delta. \quad (70)$$

д) Определение ампервитков для зубцов. Из междужелезного пространства магнитный поток проходит в сердечник якоря по зубцам и, частично, по впадинам между ними. В тех случаях, когда наибольшая индукция в зубцах получается меньше 18000 G, магнитная проницаемость впадин будет настолько мала по сравнению с проницаемостью зубцов, что первой можно пренебречь и считать, что весь поток проходит через зубцы.

Так как зубец имеет обычно коническую форму, а края впадины параллельны между собой (рис. 101, а), то индукция в различных цилиндрических концентрических сечениях зубца (на рис. 101, б показано одно такое сечение пунктиром) будет также различна.

Магнитный поток, входящий в якорь по длине каждого зубцового деления t_1 (рис. 101, а) будет:

$$\Phi_t = B_z l_1 t_1. \quad (71)$$

Площадь какого-либо сечения зубца, находящегося на расстоянии x от вершины, может быть выражена так:

$$Q_{xx} = l_z x k_2 \cong 0,9 l_z x,$$

где x — ширина зубца в рассматриваемом сечении.

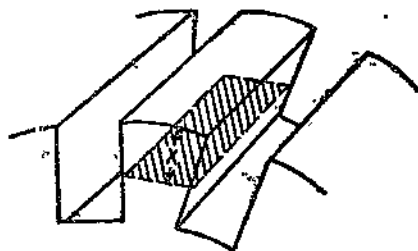


Рис. 101, б.

Отсюда индукция B_{zx} в сечении, проведенном на расстоянии x от вершины зубца, может быть установлена на основании равенства:

$$l_{ez}k_2B_{zx} = B_0l_1t_1. \quad (72)$$

Это равенство является обязательным при бесконечно малой проницаемости впадин по сравнению с зубцом и означает, что весь поток, попадающий в якорь по ширине зубцового деления, проходит через любое сечение зубца. Из равенства (72) следует:

$$B_{zx} = \frac{B_0l_1t_1}{l_{ez}k_2}. \quad (73)$$

Обычно вычисляют индукцию в двух сечениях — верхнем и нижнем, т. е.:

$$\begin{aligned} B_{z\max} &= \frac{B_0l_1t_1}{l_{ez_2}k_2}, \\ B_{z\min} &= \frac{B_0l_1t_1}{l_{ez_1}k_2}, \end{aligned} \quad (74)$$

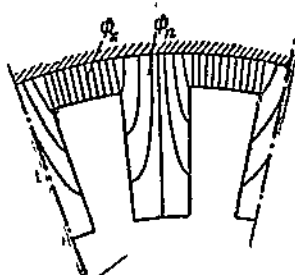


Рис. 102.

где z_2 и z_1 — ширина зубцов внизу и наверху (рис. 101, а).

После этого по кривым намагничения (рис. 94) можно определить ампервитки $aw_{z\max}$ и $aw_{z\min}$, соответствующие индукциям $B_{z\max}$ и $B_{z\min}$. Полные ампервитки:

$$AW_z = \frac{aw_{z\max} + aw_{z\min}}{2} \cdot 2h_z, \quad (75)$$

где h_z — высота зубца (рис. 95).

При значительных индукциях (порядка 18 000 Г и выше, как это обычно и бывает для зубцов) проницаемость железа, из которого изготовлены зубцы, падает и становится соизмеримой с проницаемостью впадин. Магнитный поток, входящий в якорь на длине одного зубцового деления, разветвляется на две части, проходя, главным образом, через зубец (поток Φ_z) и частично через впадину (поток Φ_n , рис. 102). На этом основании можно написать для любого концентрического сечения зубца и впадины:

$$\Phi_t = \Phi_z + \Phi_n. \quad (76)$$

Для перехода к величине индукции в данном сечении зубца поделим равенство (76) на площадь сечения Q_{zx} , находящуюся на расстоянии x от вершины:

$$\frac{\Phi_t}{Q_{zx}} = \frac{\Phi_z}{Q_{zx}} + \frac{\Phi_n}{Q_{zx}}. \quad (77)$$

Помножая и деля второй член правой части этого уравнения на Q_n — площадь сечения впадины, включая и часть вентиля-

ционных каналов, приходящуюся на данное зубцовое деление, равную, например, для верхнего сечения зубца:

$$Q_n = lt_1 - k_2 s_1 l_c,$$

получим:

$$\frac{\Phi_t}{Q_{zx}} = \frac{\Phi_z}{Q_{zx}} + \frac{\Phi_n}{Q_n} \frac{Q_n}{Q_{zx}}. \quad (78)$$

Принимая во внимание: 1) что $\frac{\Phi_t}{Q_{zx}} = B_{zT}$ есть теоретическая индукция в рассматриваемом сечении зубца, которая получилась бы в случае, если бы весь поток Φ_t прошел через зубец; 2) что $\frac{\Phi_z}{Q_{zx}} = B_{zD}$ есть действительная индукция в зубце, и 3) что $\frac{\Phi_n}{Q_n} = H_n$ есть напряжение магнитного поля во впадине, так как проницаемость воздуха $\mu = 1$, имеем:

$$B_{zT} = B_{zD} + H_n \frac{Q_n}{Q_{zx}} \quad (79)$$

или, вводя обозначение

$$\frac{Q_n}{Q_{zx}} = k_3, \quad (80)$$

получим:

$$B_{zT} = B_{zD} + k_3 H_n. \quad (81)$$

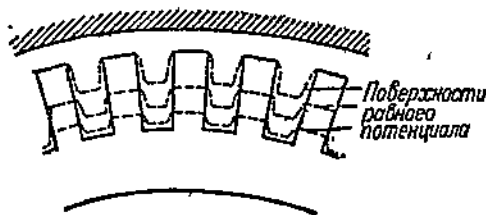


Рис. 103.

Для определения H_n введем упрощающее предположение, что поверхности равного потенциала совпадают с concentрическими сечениями зубца и впадины.

В этом случае можно принять напряжение поля во впадине (H_n) равным таковому же, имеющему место в зубце (H_z) в том же concentрическом сечении. Напряжение же поля в зубце может быть выражено через ампервитки, необходимые для проведения потока через данное сечение. Имеем:

$$H_z = \frac{aw_z}{0,8} \cong H_n.$$

На самом деле поверхности равного потенциала имеют вид рис. 103 и напряжение поля во впадине не равно таковому же в том же concentрическом сечении зубца. Принятое допущение не вносит, однако, существенной ошибки.

Подставляя последнее выражение в (81), имеем:

$$B_{zT} = B_{zD} + 1,25 k_3 aw_z. \quad (82)$$

Чтобы применить полученную формулу для расчета ампервитков, поступаем следующим образом. Задаемся рядом значений B_{zD} и отыскиваем по кривой намагничивания листового железа зубцов величины ампервитков aw_z , соответствующие данным значениям B_{zD} . Имея, кроме того, размеры зубцов, можем

вычислить для некоторого сечения зубца коэффициент k_3 . После этого нетрудно найти B_{zT} по формуле (82). Напомним, что:

$$k_3 = \frac{Q_n}{Q_{zx}} = \frac{I_x - k_2 z_x I_z}{I_{zx} k_2}. \quad (83)$$

Строим далее для некоторого значения k_3 кривую индукций B_{zD} и B_{zT} в функции ампервитков aw_z (рис. 104, а). Получим для ряда значений k_3 ряд кривых теоретической индукции B_{zT} , рассчитанные каждая для определенного значения коэффициента k_3 (рис. 104, б). Очевидно, что однажды построенные кривые для различных значений k_3 для некоторого сорта железа позволяют рассчитывать индукции для любой машины, зубцы которой изготовлены из данного материала, а значения k_3 лежат в пределах тех значений этого коэффициента, для которых построены кривые рис. 104, б. Имея кривые, можем пользоваться ими для конкретного расчета машины. Определяем теоретическую индукцию для

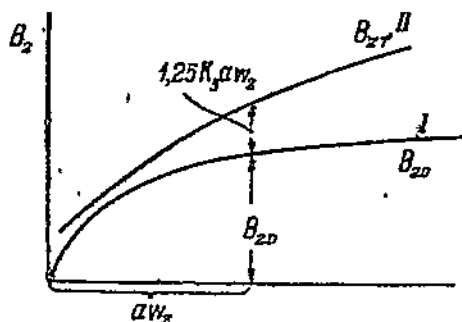


Рис. 104, а.

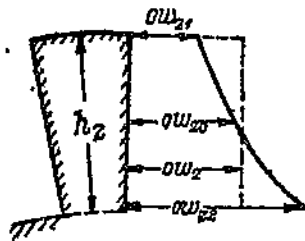


Рис. 105.

данного сечения B_{zT} , пользуясь формулой (73). Находим по кривой рис. 104, б для предварительно определенного k_3 величину aw_z . Имея aw_z , определяем индукцию B_{zD} по кривой рис. 104, б, соответствующей значению $k_3 = 0$.

Пример. В результате подсчета по формуле (73) имеем для некоторого сечения зубца $B_{zT} = 23\ 000$, $k_3 = 1,5$.

По кривым рис. 104, б находим $aw_z = 780$, $B_{zD} = 21\ 600$.

Проведя расчет для ряда сечений и нанеся aw в функции расстояния от вершины x , получим кривую рис. 105, где представлен зубец и отложены ампервитки против соответствующих сечений зубца. Спланиметрировав площадь этой кривой и разделив ее на h_z (основание), получим высоту эквивалентного прямоугольника aw_z . Полные ампервитки будут тогда:

$$AW_z = aw_z 2h_z. \quad (84)$$

Ввиду того, что кривая рис. 105 весьма близка к параболе, можно вычислить aw_z , пользуясь формулой Симпсона для площади параболы:

$$aw_z = \frac{aw_{z1} + 4aw_{z0} + aw_{z2}}{6}, \quad (85)$$

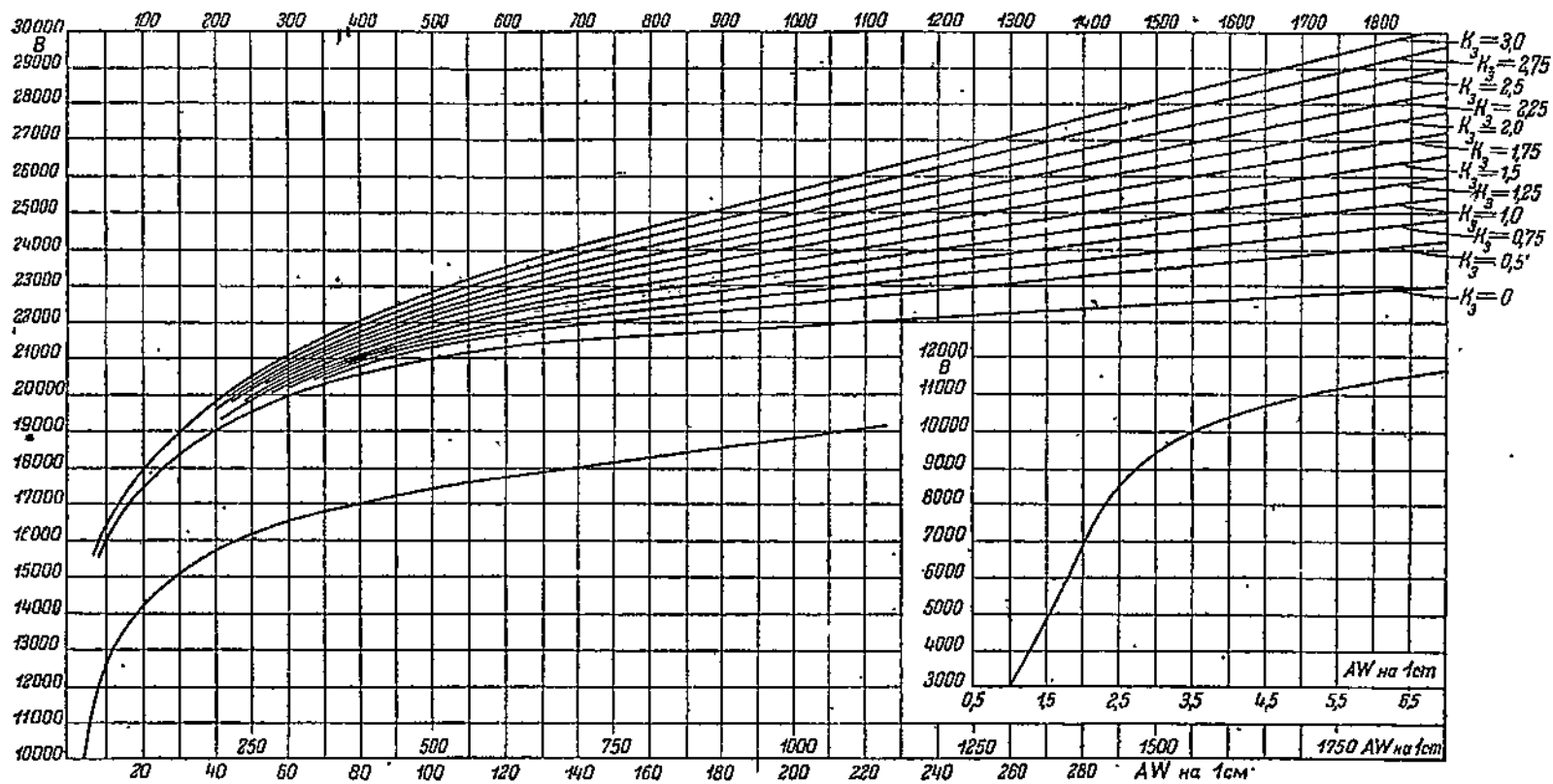


Рис 104, б.

где индексы 1, 0, 2 относятся к верхнему, среднему и нижнему сечениям зубца. Можно, поэтому, построения кривой рис. 105 и не производить, ведя расчет по формуле (85). Для этого необходимо вычислить три значения индукций B_{zT_1} , B_{zT_0} и B_{zT_2} :

$$\left. \begin{aligned} B_{zT_1} &= \frac{B_s t_1 l_1}{k_z z_1 l_c} \\ B_{zT_0} &= \frac{B_s t_1 l_1}{k_z z_0 l_c} \\ B_{zT_2} &= \frac{B_s t_1 l_1}{k_z z_2 l_c} \end{aligned} \right\} \quad (86)$$

затем определить по формуле (83) коэффициенты $k_{z(1)}$, $k_{z(0)}$, $k_{z(2)}$ для тех же сечений и найти необходимые ампервитки aw_{z_1} , aw_{z_0} и aw_{z_2} , а также действительные индукции, пользуясь кривыми рис. 104, б. Результирующие ампервитки найдем по формуле (85), после чего легко определить:

$$AW_z = \frac{aw_{z_1} + 4aw_{z_0} + aw_{z_2}}{6} 2h_z. \quad (87)$$

5. Кривая намагничивания и кривая поля машины при холостом ходе.

Для суждения о свойствах рассчитываемой машины обычно недостаточно знать суммарные ампервитки AW_f (формула 40) для некоторого одного определенного значения магнитного потока Φ_m , а необходимо вести расчет для ряда значений потока Φ_m , отвечающих различным значениям э. д. с., как большим, так и меньшим нормальной ее величины для данной машины. Если отложить вычисленные таким образом ампервитки AW_f по оси абсцисс прямоугольной координатной системы, а по оси ординат нанести соответствующие значения потока Φ_m то получим график функции $\Phi_m = f(AW_f)$ в виде кривой намагничивания машины (рис. 106).

Кривая имеет в начальной своей части прямолинейный характер в связи с тем, что при малых значениях ампервитков, а следовательно, и индукций, проницаемость железных частей пути магнитного потока весьма велика. Почти все ампервитки идут на проведение потока через междужелезное пространство. Так как магнитная проницаемость воздуха — величина постоянная ($\mu = 1$), то Φ_m пропорционален AW_f . По мере увеличения ампервитков железо начинает постепенно насыщаться, прони-

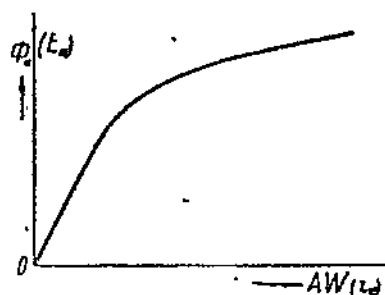


Рис. 106.

цаемость его падает и кривая теряет прямолинейный характер, делаясь вогнутой в сторону абсцисс; далее кривая намагничивания хотя и выпрямляется, но составляет с осью абсцисс уже значительно меньший угол. Нормальное значение потока Φ_a машины, соответствующее номинальной э. д. с., приходится обычно на изогнутой части — колене кривой.

По оси ординат графика может быть отложено не только значение потока, но и соответствующие данному потоку значения э. д. с. машины при номинальном числе оборотов якоря в минуту. Таким образом получаем кривую $E_a = f(AW)$. При вполне определенном числе витков обмотки возбуждения w_e можно, зная AW , найти ток возбуждения:

$$i_a = \frac{AW}{w_e} \quad (88)$$

и построить кривую $E_a = f(i_a)$. Эта кривая носит название характеристики холостого хода и может быть практически заснята на готовой машине. Вид ее, конечно, тот же, что и кривой намагничивания.

Кривая намагничивания, характеризующая магнитные свойства машины, позволяет судить о насыщенности магнитной цепи и изменении магнитного потока Φ_a при изменении тока i_a , но ничего не говорит о том, как этот поток распределен в самой машине. Чтобы судить о распределении поля в междужелезном пространстве, необходимо построить кривую поля. Эта кривая нам необходима как для уточнения расчета полюсной дуги b' , определяющей число ампервитков междужелезного пространства, так и для начертания результирующих кривых магнитного поля при нагрузке машины.

Построение кривой магнитного поля приходится вести, исходя из картины магнитных силовых трубок в воздушном зазоре машины.

Такую картину нужно построить на-глаз, руководствуясь теми соображениями, что, во-первых, магнитные линии выходят из полюсного наконечника и входят в якорь перпендикулярно к их поверхностям и, во-вторых, распределение магнитных линий будет всегда таким, чтобы магнитный поток имел наибольшее возможное значение. Картину поля приходится, поэтому, строить несколько раз и принять за истинную картину ту, которая дает наибольший поток, т. е. наибольшую площадь кривой поля.

Построение производится для гладкого якоря, необходимый же учет зубчатого его строения производится после, путем введения соответствующих коэффициентов K_c и K_c'' (см. выше). Предполагая, что разность магнитных потенциалов между поверхностями полюсного наконечника и якоря постоянна по всей окружности якоря, можем, вместо магнитного потока, рассматривать пропорциональную ему величину магнитной проводимости. На рис. 107, а показана картина поля, причем принято, что: z — есть длина силовой трубки номера x , b_x — ширина

трубки в среднем сечении, a_x — ширина трубки у поверхности якоря.

Согласно закону магнитной цепи, имеем проводимость трубки:

$$\lambda_x = \frac{1}{\frac{\delta_x}{b_x \cdot 1}} = \frac{b_x}{\delta_x}, \quad (89)$$

причем рассматриваем трубки, имеющие размер в 1 см в направлении оси машины.

Магнитный поток одной трубки:

$$\Delta\Phi = 0,2\pi (AW_i + AW_z + AW_a) \frac{b_x}{\delta_x}.$$

Магнитная индукция в среднем сечении трубки:

$$B'_x = \frac{\Delta\Phi}{b_x \cdot 1} = 0,2\pi (AW_i + AW_z + AW_a) \frac{1}{\delta_x}. \quad (90)$$

Так как поток каждой трубки предположен неизменным (по ее определению), то для нахождения индукции у поверхности якоря в точке x имеем соотношение:

$$B'_x b_x = B_x a_x,$$

откуда определяется индукция:

$$B_x = 0,2\pi (AW_i + AW_z + AW_a) \frac{b_x}{a_x \delta_x}. \quad (91)$$

Под серединой полюса имеем индукцию:

$$B_s = 0,2\pi (AW_i + AW_z + AW_a) \frac{1}{\delta}, \quad (92)$$

так как трубки имеют здесь неизменное сечение.

Беря отношение двух последних равенств, имеем:

$$B_x = B_s \frac{b_x \delta}{a_x \delta_x}, \quad (93)$$

откуда и находим B_x для любой трубки.

Имея ряд значений B_x , наносим их в прямоугольной координатной системе в функции расстояния от нейтральной зоны поля. Имеем кривую поля (рис. 107, б).

В частях кривой, близких к нейтральной зоне, получаются значения индукций большие действительных, так как, рассматривая лишь один полюс, как это мы делали до сих пор, мы предполагаем неизменный знак разности магнитного потенциала даже при переходе через нейтральную линию. В этом случае поле будет спадать асимптотически до нуля. Ввиду наличия в действительности соседних полюсов противоположной поляр-

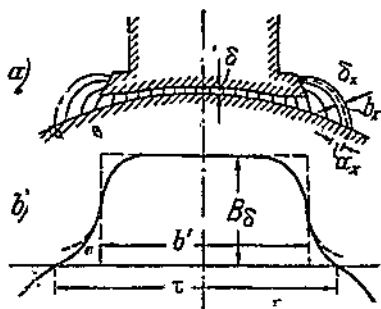


Рис. 107.

ности, имеем падение поля до нуля на нейтрали. Для учета действия соседних полюсов строим зеркальное изображение кривой поля и сопрягаем обе кривые прямой, проходящей через нулевое значение индукции на нейтрали.

ГЛАВА IV.

РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ И РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ПРИ НАГРУЗКЕ.

1. Влияние тока в обмотке якоря на поле машины.

До тех пор, пока в обмотке якоря нет тока, все магнитное поле машины определяется ампервитками полюсов и распределение его относительно средней линии полюсов получается вполне симметричным. На рис. 108 дана картина распределения магнитных линий этого поля; кривая распределения индукции

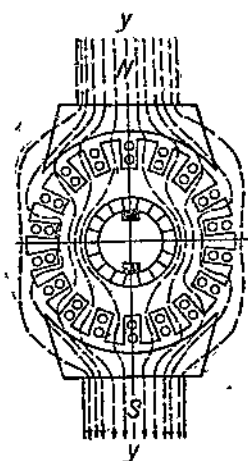


Рис. 108.

для этого случая была построена на рис. 107. Как только вслед за замыканием щеток машины на внешнее сопротивление по обмотке якоря пойдет ток, якорь сам станет источником м. д. с., которая и будет взаимодействовать с м. д. с. полюсов. Результирующая м. д. с. создаст в машине магнитное поле, которое может уже значительно отличаться от поля при холостом ходе.

Для выяснения влияния м. д. с. якоря на поле машины попытаемся сперва воспроизвести картину того поля, которое было создано в машине, если бы полюсы не были возбуждены, а некоторый ток протекал только по якорю. Практически можно получать такого рода картину в том случае, если пропускать через якорь ток от постороннего источника, не пропуская в то же время тока через обмотку возбуждения.

Распределение тока в якорной обмотке будет в таком случае одним и тем же, независимо от того, создает ли машина ток сама или же он обтекает обмотку якоря, будучи подан извне. Необходимо только направление обтекания током обмотки согласовать с тем, которое имело бы место при работе машины. Тогда в каждой параллельной ветви якоря ток будет идти так, как показано на рис. 109, а, имея одно направление в стержнях, лежащих под северным полюсом, и противоположное в находящихся под южным. Щетки, наложенные на коллектор машины, подводя ток, будут определять место его раздела. Род обмотки якоря не будет влиять на токораспределение, так как соединения между стержнями лежат вне магнитной цепи на лобовых частях якоря. Токораспределение, согласно рис. 109, а, дает право рассматривать якорь как катушку, причем ось этой ка-

тушки, или так называемая „магнитная ось якоря“, перпендикулярна к линии YY , соединяющей щетки. Отметим, что положение щеток „на нейтрали“ соответствует расположению их, в барабанной обмотке, на оси полюсов, магнитная же ось якоря

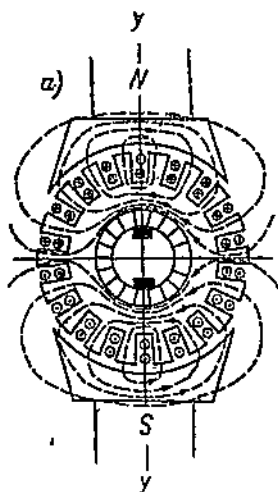


Рис. 109, а.

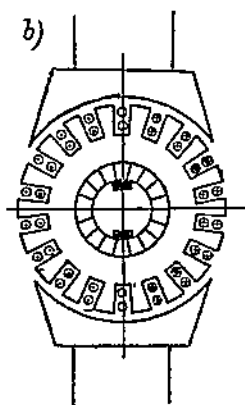


Рис. 109, б.

совпадает в этом случае с нейтральной линией поля полюсов. В случае многополюсной машины одной из магнитных осей будет служить продолжение (радиуса, проведенного из центра якоря к нейтральной точке поля. Заменяя обмотку якоря непо-

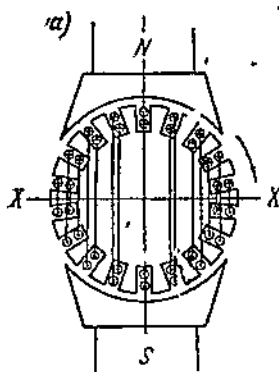


Рис. 110, а.

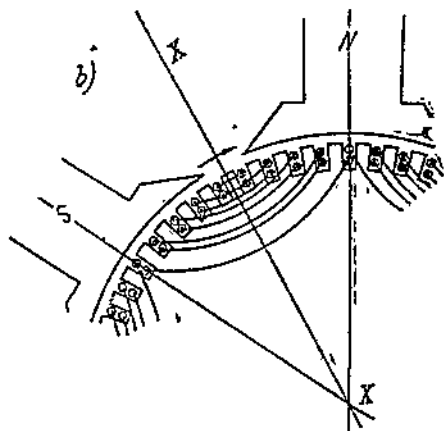


Рис. 110, б.

движной катушкой, наложенной на цилиндрическую поверхность якоря, получим картину соединений для двухполюсной машины (рис. 110, а) и для многополюсной (рис. 110, б). Отметим, что все рассмотрение ведется нами в предположении барабанного зуб-

чатого якоря. Легко видеть, что в случае кольцевого якоря поток его распределится так же, как для барабанного.

Рассмотрим теперь картину якорного поля в предположении, что щетки находятся на нейтральной линии. Тогда магнитные линии поля распределятся согласно рис. 109, а. Как видно из рисунка, линии эти имеют в значительной части своего пути направление, перпендикулярное к линиям поля полюсов (рис. 108). Лишь по краям полюса линии якорного поля направлены по тем же путям, что и линии потока полюсов.

Воспользуемся рис. 109, а для того, чтобы сделать еще один важный вывод. Магнитное поле якоря при вращении этого последнего в нем самом, очевидно, в состоянии индуцировать в отдельных проводниках якоря некоторую э. д. с. Направление этих э. д. с. представлено на рис. 109, б, причем вследствие симметрии поля суммарные э. д. с., индуцированные в проводниках, лежащих в каждом из четырех квадрантов якоря, будут между собой равны. Так как в одну параллельную ветвь входят проводники верхних двух квадрантов, а в другую — двух нижних, то очевидно, что суммарная э. д. с., индуцированная полем якоря в отдельных параллельных ветвях, всегда равна нулю.

Предполагая, что магнитная цепь машины совершенно не насыщена, попытаемся теперь найти картину результирующего магнитного поля, имеющего место в машине при нагрузке. Для этого наложим картину линий рис. 109, а на картину рис. 108, соблюдая их взаимное расположение в машине относительно нейтральной оси. То поле, которое получится при таком наложении, изображено на рис. 111. Как видно, произошло искажение поля: последнее стало асимметрично по отношению к средней линии полюсов. При этом для режима работы генератором под сбегающим краем полюса (полюсного наконечника) получится сгущение магнитных линий, а под набегающим — разрежение. Максимум поля сместится, и наибольшая величина э. д. с. будет индуцироваться в проводниках, лежащих не под серединой полюса, а в месте, несколько сдвинутом от нее. Это смещение максимума повлечет за собой искажение всей кривой поля и смещение нейтральной линии его по направлению вращения машины, что, в свою очередь, может вредно отозваться на коммутации машины.

При проходе секции под щеткой происходит, как указывалось выше, замыкание ее накоротко щеткой с последующим переключением в другую ветвь якоря. Вследствие весьма незначительного сопротивления контура, замкнутого щеткой, даже небольшая э. д. с., индуцированная в нем, может вызвать в контуре значительный ток короткого замыкания, который, налагаясь на внешний ток, текущий через щетки в сеть, может нарушить равномерное распределение тока под щеткой. Следствием этого явится неравномерная плотность тока под щеткой и нагрев того или другого ее края, могущий облегчить образование вольтовых дуг — искрения на коллекторе.

При сдвиге нейтрали поля машины получается замыкание щеткой накоротко секции при нахождении последней в некотором более или менее сильном поле. В результате в секции индуктируется внешним полем э. д. с., которая создает добавочный ток и может вызвать искрение под щеткой.

Существует, однако, простой способ избежать появления э. д. с. в короткозамкнутой секции. Достаточно сдвинуть щетки, приведя магнитную ось в положение переместившейся нейтрали, чтобы вновь вести процесс коммутации при отсутствии внешнего поля. Такое перемещение будет, однако, сопровождаться изменением влияния самого якорного поля на поле полюсов, ввиду чего вопрос решается не так просто. Кроме того, как

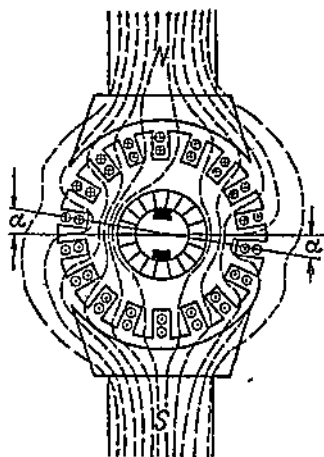


Рис. 111.

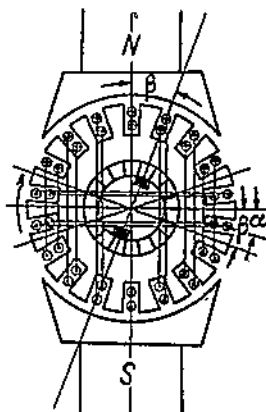


Рис. 112.

увидим в дальнейшем, для хорошей коммутации необходимо помещать короткозамкнутые секции в некоторое внешнее поле определенного направления, что еще более усложняет дело.

Отвлекаясь пока от того, что имеет место в коммутационной зоне, обратимся к выяснению влияния поля якоря на поле полюсов при щетках, смещенных с нейтрали на некоторый угол β (рис. 112). Щетки, фиксируя попрежнему токораспределение в якоре машины, будучи смещены от нейтральной линии, переместят магнитную ось якоря на тот же угол β . В результате влияние сдвига щеток скажется не только в искажении поля полюсов, но и в изменении величины индуктирующего потока.

Для выяснения сути явлений, имеющих при этом место, предположим, что индукции поля полюсов и поля якоря распределены синусоидально вдоль окружности последнего. В этом случае представляется возможным рассматривать поля в виде некоторых векторов, имеющих величину, равную амплитуде индукций поля полюсов B_1 и поля якоря B_2 . Направление этих векторов определится: для B_1 — полярностью главных полюсов

машин, для B_2 — положением щеток на коллекторе. При положении щеток на нейтральной линии согласно рис. 111 имеем картину векторов рис. 113, а. Результирующая индукция B_r получается, как видно, больше, чем B_1 , т. е. результирующее магнитное поле машины увеличивается.

Вполне, однако, ясно, что величина э. д. с., индуцированной в якоре, при этом не изменяется, так как благодаря сдвигу результирующего потока э. д. с. в части активных проводников каждой параллельной ветви оказывается направленной встречно к таковой же, индуцированной в большинстве остальных проводников той же ветви. Проведя нейтраль результирующего поля (прямая $X'X'$), видим, что в проводниках верхней парал

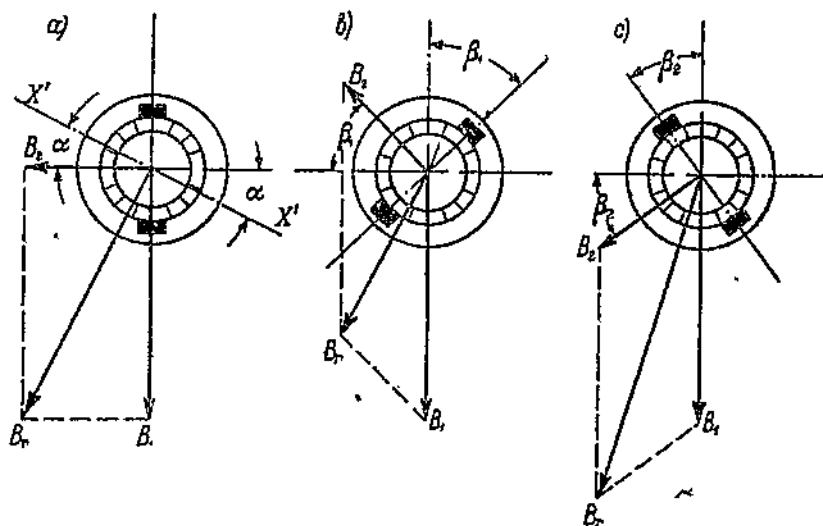


Рис. 113.

лельной ветви, лежащих в угле α сдвига нейтралей, индуцируется э. д. с., направленная противоположно к таковой же в остальных проводниках; то же имеет место и в нижней параллельной ветви. Таким образом, несмотря на увеличение результирующего потока, э. д. с. остается прежней, так как индуктирующее действие поля уменьшается. То обстоятельство, что при появлении якорного поля э. д. с. не изменилась, ясно также из тех соображений, что поле якоря, будучи направлено всегда по линии раздела параллельных ветвей, не может индуктировать в них никакой результирующей э. д. с., так как в каждой половине параллельной ветви им создаются э. д. с., равные и противоположно направленные, как это было показано выше на рис. 109, б. Сдвинем теперь щетки с нейтралей на угол β_1 . Картина векторов для этого случая представлена на рис. 113, б. Результирующий поток при этом уменьшается. Э. д. с. машины неизбежно падает. Причиной падения э. д. с. является теперь то

обстоятельство, что ввиду смещения щеток поток полюсов индуцирует в части параллельных ветвей противоположно направленные э. д. с. Поток якоря попрежнему никакой результирующей э. д. с. индуцировать не может. Таким образом причиной уменьшения э. д. с. является не уменьшение амплитуды результирующей индукции B , а смещение магнитной оси якоря в поле полюсов. Точно такое же падение э. д. с. получается и при холостом ходе машины, если начать смещать щетки с нейтрали. При нагрузке машины и сдвиге щеток против направления вращения на угол β_2 (рис. 113, с) получается, как видно, даже увеличение результирующего поля. Э. д. с., однако, и в этом случае неизбежно падает, так как на нее оказывает влияние лишь основной поток полюсов.

Изложенное упрощенное рассмотрение влияния поля якоря на поле полюсов нуждается в весьма существенных коррективах. Поле якоря не является синусоидальным по причине несинусоидальности формы кривой магнитодвижущей силы, его создающей, и неравномерности воздушного зазора. Поле полюсов также несинусоидально вследствие большего зазора под краями полюсных наконечников; последнее необходимо для получения удовлетворительной коммутации. Магнитная цепь машины постоянного тока значительно насыщена, что не дает права непосредственно складывать поля. Эти три обстоятельства заставляют подойти более строго к учету влияния поля якоря на поле полюсов, причем приходится стать на путь графического сложения кривых м. д. с.

2. Поле якоря и построение кривой результирующего поля. Окончательные выводы о влиянии поля якоря на поле полюсов и э. д. с. машины.

Для получения картины результирующего поля машины при нагрузке необходимо сложить ординаты кривой поля при холостом ходе (рис. 107) с соответствующими ординатами кривой якорного поля. Эта последняя кривая может быть легко получена на основании следующих соображений.

Каждый виток катушки, которой мы заменили якорную обмотку, дает свое поле, причем распределение этого поля по развертке на плоскость поверхности якорного цилиндра может быть представлено в виде прямоугольника (рис. 114), если предположить, что проводимость пути для линий поля якоря везде одинакова. Действительно, если на всем промежутке между проводниками действует одна и та же м. д. с., то, пренебрегая разницей в длине линий, можно считать распреде-

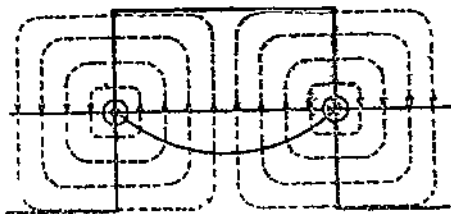


Рис. 114.

ление магнитного потока, созданного этой м. д. с., равномерным. При таком равномерном распределении поля получается постоянное значение индукции на всем протяжении от одной до другой стороны катушки, что даст прямоугольную кривую. При ряде витков получим наложение прямоугольников, создаваемых отдельными витками, что соответствует ступенчатой кривой поля якоря на рис. 115. Здесь дана развернутая картина неподвижной катушки, наложенной на поверхность якоря, а также кривая поля отдельных витков и результирующая кривая. При достаточно большом числе проводников на якоре ступенчатая кривая может быть заменена треугольной (пунктирная кривая). Итак, в случае одинаковой магнитной проницаемости кривая поля якоря имеет треугольную форму и максимальная ордината ее расположена по магнитной оси якоря.

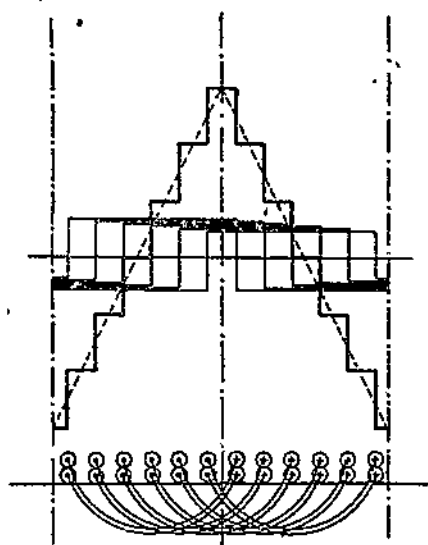
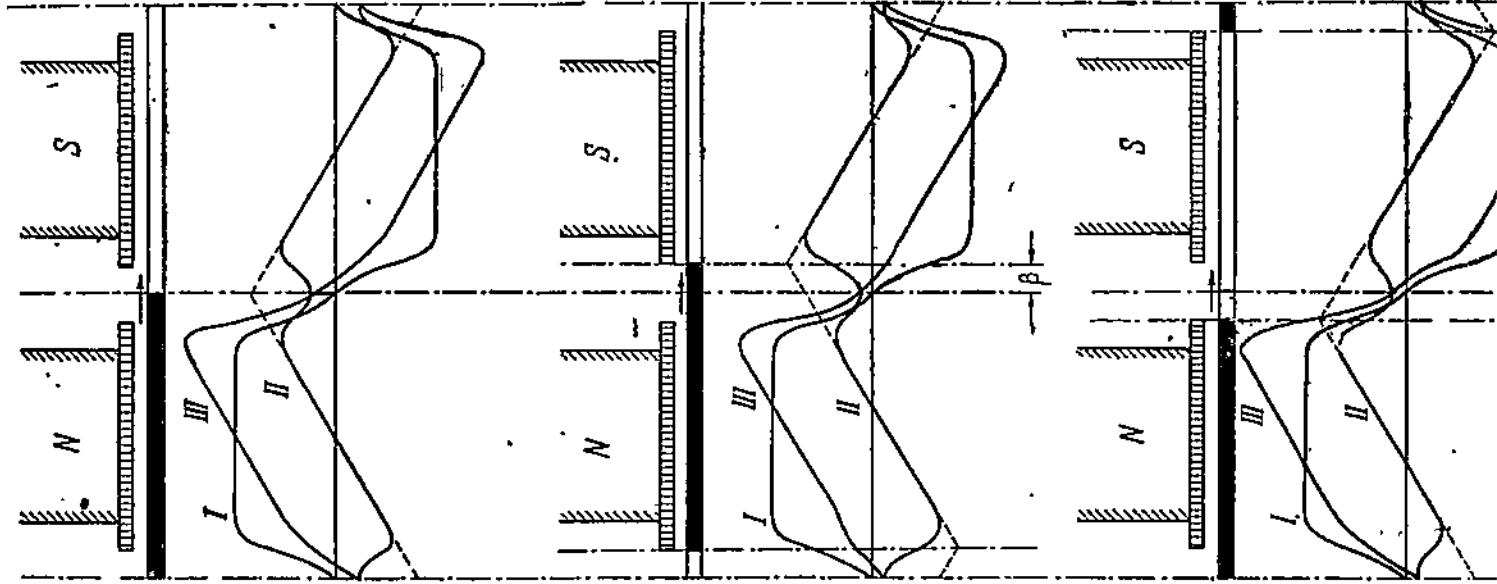


Рис. 115.

У машины обычной конструкции проницаемость для якорного поля будет изменяться вдоль окружности якоря. В промежутке между полюсами проницаемость будет наименьшей; наоборот, под полюсами она достигает значительной величины. В соответствии с этим кривая поля якоря (II) получит вид, показанный рис. 116, а, где в промежутках между полюсами показано уменьшение ординат поля и вследствие этого искажение кривой поля в данном месте. Когда щетки сдвинуты с ней-

трали по направлению вращения, кривая поля якоря (II) получает несимметричный вид, согласно рис. 116, б; кривые поля полюсов (I) и результирующего поля (III) для этого случая даны на том же рисунке. При сдвиге щеток против направления вращения имеем кривые, показанные на рис. 116, с.

Складывая на рис. 116 а, б и с ординаты кривых поля полюсов (I) и поля якоря (II), получаем результирующую кривую (III). Так как положение щеток, соответствующее рис. 116, а, выбрано на нейтральной линии, то в соответствии с этим показано и распределение токов в виде различно заштрихованных частей полосы, изображающей развернутый активный слой якоря. В этом случае получается симметричное расположение зон с одинаковым направлением токов по отношению к полюсам. Из рис. 116, а усматриваем, что усиление поля под одной половиной полюса компенсируется ослаблением поля под другой его половиной. Э. д. с., индуцированная в каждой зоне, не меняется, так как она определяется интегралом потока по



полюсному делению τ . Поскольку кривая поля якоря имеет в этом случае в пределах полюсного деления равные положительные и отрицательную площади, то, очевидно, она не оказывает влияния на поток в пределах τ . На общую же величину потока реакция якоря, конечно, оказывает влияние, несколько увеличивая ее (полный поток определяется всей площадью кривой *III*, лежащей по одну сторону оси абсцисс). Последнее вполне согласуется с теми выводами, которые мы сделали, рассматривая картину сложения полей в предположении их синусоидального распределения. Качественно, таким образом, картина остается прежней, количественно, с точки зрения общей величины потока, получаем, конечно, другой результат.

При сдвиге щеток с нейтрали по направлению вращения картина сложения полей будет иметь вид рис. 116, б. В этом случае площадь кривой результирующего поля в пределах каждой зоны с одинаковым направлением тока уменьшается. Рассматривая левую зону, видим, что отрицательная часть кривой поля якоря, приходящаяся на положительную часть кривой основного поля, становится больше. Происходит это благодаря тому, что проводимости для якорного поля получаются неодинаковыми под полюсами и в промежутке между ними. Э. д. с. машины уменьшается, во-первых, потому, что уменьшается площадь кривой поля полюсов в пределах каждой зоны с одинаковым направлением тока (часть зоны попадает в сферу действия полюса противоположной полярности) и, во-вторых, потому, что отрицательная часть кривой поля якоря (для левой зоны) становится больше, чем положительная, вследствие того, что положительная часть приходится в том месте, где воздушный зазор больше — в промежутке между полюсами. Для правой зоны отрицательная часть кривых является основной индуктирующей частью, так как здесь ток идет в обратном направлении. Все обстоит, очевидно, так же, как для левой зоны, и э. д. с. уменьшается.

В этом случае получается, как видно, расхождение с теми результатами, которые мы получили при рассмотрении реакции якоря упрощенным способом. Поле якоря, оказывается, может влиять на э. д. с. машины за счет разницы в проводимостях для того поля в различных точках воздушного зазора.

При сдвиге щеток с нейтрали против направления вращения имеем картину полей согласно рис. 116, в. В этом случае имеются два фактора, влияющие на э. д. с. якоря в противоположных направлениях. Смещение зоны с одинаковым направлением тока в проводниках в поле главных полюсов ведет, как и в прошлом случае, к уменьшению э. д. с. Последнее будет иметь место и при холостом ходе машины, в случае сдвига щеток с нейтральной линии. Смещение поля якоря вызывает возрастание положительной части его потока, что ведет к увеличению э. д. с. Ввиду этого возможно при небольших углах сдвига щеток даже увеличение э. д. с., быстро компенсируемое затем

при дальнейшем увеличении угла сдвига щеток встречными э. д. с., индуктируемыми в части проводников.

В случае насыщенной машины получение ординат результирующего поля путем сложения ординат полей якоря и полюсов невозможно. Ординаты результирующей кривой будут немного больше разности ординат составляющих кривых и значительно меньше суммы тех же ординат в местах их сложения. Площадь результирующего поля в пределах зоны с одинаковым направлением токов уменьшится даже в случае положения щеток на нейтральной линии. Кривые рис. 116 относились к гладкому якорю с равномерно распределенной обмоткой; в случае зубчатого якоря кривая поля, сохраняя тот же вид, получит слегка ступенчатый характер (см. рис. 115).

3. Количественный учет влияния ампервитков якоря на магнитный поток и э. д. с. машины.

Если напряжение на зажимах машины постоянного тока должно быть неизменным в пределах от холостого хода до полной нагрузки, то для компенсации влияния поля якоря должен быть изменен ток в цепи возбуждения полюсов.

Для количественного учета влияния поля якоря приходится класть в основу рассмотрения картину токов в проводниках якоря согласно рис. 112. Якорные витки можно разделить на две части: поперечные, в которых отдельные проводники при переходе к катушкам, эквивалентным обмотке якоря, будут соединены между собой, как и ранее, вертикальными соединениями, и продольные, в которых соединения будут горизонтальными. Такое разделение якорных витков необходимо потому, что продольные и поперечные ампервитки создают поля, замыкающиеся по путям с различной магнитной проницаемостью. Так, продольные ампервитки дают поле, замыкающееся по тем же путям, что и ампервитки полюсов, поперечные же ампервитки дают поток, замыкающийся через зазор между полюсами. Очевидно, что проницаемость по пути потока полюсов будет значительно больше, чем в поперечном направлении.

Влияние продольных витков на поле полюсов сводится, согласно рис. 112, к влиянию катушки, витки которой заключены в двойном угле β сдвига щеток с нейтральной линии. Исходя из этой картины, можно написать выражение продольных ампервитков, положив в основу следующие соображения.

На дуге якоря, соответствующей углу 2β , имеем $\frac{2\beta}{360}N$ проводников, где N — полное число проводников якоря. Обозначая, далее, через i_a ток в параллельной ветви, а следовательно, и в каждом проводнике, можем выразить этот ток через полный I_a , отдаваемый машиной во внешнюю сеть:

$$i_a = \frac{I_a}{2a}.$$

$$AW_d = \frac{2\beta}{360} \frac{Nl_a}{2a}.$$

Умножая и деля последнее выражение на πD , где D — диаметр явора, а также замечая, что:

представляет так называемую линейную нагрузку якоря, т. е. полное число амперпроводов, приходящееся на каждый сантиметр длины дуги якоря, имеем:

Угол β выражен здесь в пространственных градусах.

$$AW_d = 2b_3 \Delta S, \quad (95)$$

Рис. 117.

Для определения изменения магнитного поля машины ампервитками AW_a строим кривую намагничения (рис. 117), откладывая по оси абсцисс ампервитки холостого хода AW_b , а по оси ординат значение потока Φ_a . Пусть нормальному значению этой последней величины AP отвечают ампервитки OP . Тогда, откладывая $AW_a = Pa$ влево от точки P , получим Oa — результирующие ампервитки при нагрузке машины и отвечающий им уменьшенный поток ab . Поток уменьшился на величину $\Delta\Phi_a$. На рис. 117 величине $\Delta\Phi_a$ соответствует отрезок $b'b$. Чтобы заставить машину при нагрузке иметь прежний поток, а следовательно, индуцировать в якоре прежнюю э. д. с., необходимо ампервитки полюсов увеличить на $AW_a p$ (даже немного более вследствие изменения условий рассеяния).

Поперечные ампервитки AW_q создаются всеми витками обмотки якоря, стороны которых уложены на остальной его дуге, т. е.:

Однако непосредственно действующей на полюсы является лишь та часть этих ампервитков, которая лежит непосредственно под полюсами на длине b . Отсюда необходимо принять во внимание лишь:

$$AW'_a = bAS. \quad (97)$$

Для учета размагничивающего действия этих ампервитков на поле машины заметим, что половина их $— \frac{1}{2} bAS$ — действует на один край полюсного наконечника, а другая половина — на второй, причем под сбегающим краем полюса получается намагничение и под набегающим — размагничение, чем и определяется знак ампервитков $\Delta W_q'$ при их суммировании с ΔW_l .

Поперечные ампервитки якоря дают магнитные линии одинакового направления с линиями поля полюсов лишь в зубцах и междужелезном пространстве (частью пути в полюсных наконечниках пренебрегаем). Это видно на рис. 118, где линия якорного поля показана сплошной, а поля полюсов — пунктирной. Поэтому при учете влияния поперечных ампервитков следует пользоваться не полной кривой намагничивания, как то мы делали при учете влияния продольных, а лишь кривой

$$\Phi_a = f\left(\frac{\Delta W_i + \Delta W_z}{2}\right),$$

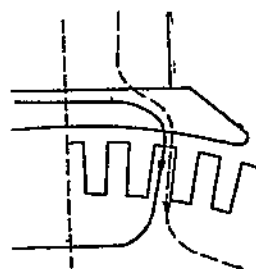


Рис. 118.

которая носит название переходной характеристики и представляет зависимость потока от ампервитков, необходимых для проведения этого потока один раз через междужелезное пространство и зубцы. Ввиду относительно малой величины всех остальных ампервитков по сравнению с ΔW_i и ΔW_z , можно с некоторым приближением пользоваться непосредственно кривой намагничивания, откладывая

$$\Phi_a = f\left(\frac{\Delta W_l}{2}\right),$$

где $\frac{\Delta W_l}{2}$ — полные ампервитки возбуждения на один полюс.

На рис. 119, а изображена эта последняя кривая, причем отрезок OP равен полным ампервиткам на один полюс при холостом ходе и нормальном значении потока Φ_a . Та же кривая в пересчитанном масштабе представит собой индукцию в междужелезном пространстве под полюсом, так как:

$$\Phi_a = B_z l_1 b' \cong B_z l_1 b,$$

согласно ф-ле (60).

Легко видеть, что кривая рис. 119, а дает не только значения индукции B_z при изменении ампервитков возбуждения полюсов, но и распределение индукции под полюсным наконечником, если по длине его будут действовать, кроме некоторых фиксированных ампервитков возбуждения OP , также ампервитки, определяемые током в якоре. Откладывая вправо и влево от точки P , соответствующей номинальному напряжению, ампервитки $\frac{1}{2} bAS$, получим dc_1 — индукцию под сбегающим краем наконечника (здесь действуют ампервитки $OP + \frac{1}{2} bAS$) и ab_1 — индукцию под набегающим краем (здесь имеем ампервитки OP —

$\frac{1}{2} bAS$). Как видно из кривой, уменьшение индукции под сбегающим краем не компенсируется увеличением ее под набегающим краем.

Обращаясь теперь к магнитному полю, можно установить, что площадь прямоугольника $abcd$ пропорциональна нормальному значению потока Φ_a при холостом ходе, так как высота прямоугольника AP соответствует индукции B_s , а основание $ad = bAS$, т. е.:

$$B_s bAS = \Phi_a \frac{AS}{l_1} = C\Phi_a,$$

так как AS и l_1 — величины постоянные для данной машины и ее нагрузки.

При появлении поперечных ампервитков якоря получается площадь ab_1c_1d , пропорциональная потоку при нагрузке машины, так как кривая намагничивания, ограничивающая эту площадь сверху, дает распределение индукции под полюсом на дуге b . Площадь ab_1c_1d , а следовательно, и поток Φ_a , будут неизменны только в том случае, если площади Abb_1 и Ass_1 будут равны между собой. Ввиду большего размагничивания сбегающего края, чем намагничивания набегающего, равенства этого на рис. 119, *a* нет. Получается уменьшение потока Φ_a и, как следствие, падение э. д. с. машины. Чтобы при наличии поперечных ампервитков якоря создать в машине прежний магнитный поток, необходимо увеличить ампервитки возбуждения полюса на величину $\frac{AW_p}{2}$, переместив прямую bc вправо так, чтобы площади Abb_1 и Ass_1 стали между собой равны (рис. 119, *b*). Равенство потока Φ_a при холостом ходе и при нагрузке будет тогда восстановлено и э. д. с. останется на прежней высоте. Очевидно, что при новом значении ампервитков возбуждения, равном OP' , получится, при сбрасывании нагрузки, несколько большая индукция (на величину ΔB_s), а следовательно, и э. д. с. большая, чем номинальное ее значение, установленное в холостом ходу.

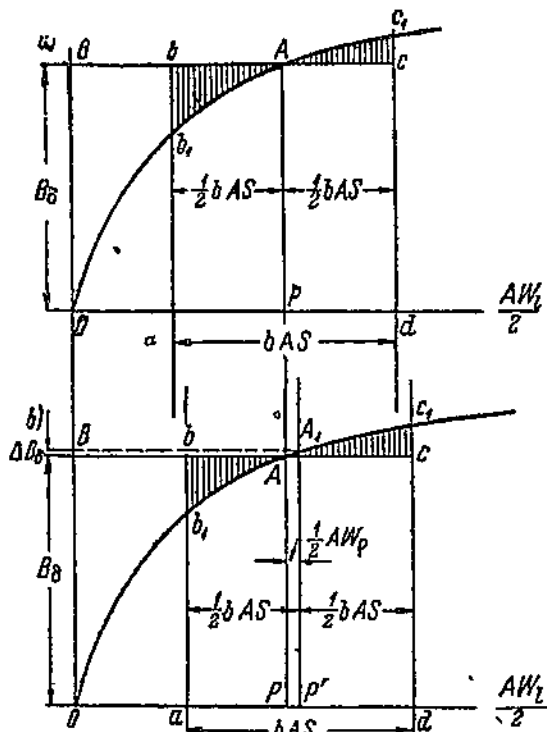


Рис. 119.

Полные ампервитки, на которые приходится увеличивать AW_i полюсов для компенсации размагничивания от поперечных ампервитков, будут равны:

$$2p \cdot \frac{AW_p}{2} = pAW_p.$$

Выше мы видели, что продольно размагничивающие ампервитки на пару полюсов выражаются так:

$$AW_d = 2b_p AS.$$

Размагничивающее действие поперечных ампервитков на полюс может быть представлено в виде:

$$\frac{1}{2} AW_p = pAS,$$

где величина p определяется путем деления отрезка PP' , выраженного в ампервитках, на соответствующую линейную нагрузку.

Отсюда:

$$AW_p = 2pAS.$$

Размагничивающие ампервитки на пару полюсов:

$$AW_d + AW_p = 2(b_p + p) AS. \quad (98)$$

При расчете машины величина b_p не всегда бывает известна, ввиду чего часто вычисляют размагничивающие ампервитки по формуле:

$$AW_d + AW_p = \gamma(\tau - b'_p) AS, \quad (99)$$

где γ — коэффициент, лежащий в пределах 0,5—1,0; при этом для сильно насыщенных машин берут меньшие значения, а для слабо насыщенных — большие.¹⁾

Итак, при нагрузке машины надлежит вести расчет ампервитков возбуждения на пару полюсов, исходя из формулы:

$$AW_k = AW_i + AW_d + AW_p \quad (100)$$

и полных ампервитков:

$$AW_t = pAW_k. \quad (101)$$

Отметим, что расчет ампервитков, входящих в выражение (36) для AW_i , надлежит при нагрузке вести, исходя не из потока при холостом ходе машины, а из несколько повышенного его значения. В самом деле, при нагрузке напряжение на зажимах машины:

$$U = E - I_a R_a, \quad (102)$$

где E — электродвижущая сила, индуктированная в якоре при нагрузке, R_a — сопротивление обмотки якоря.

¹⁾ Такой выбор величины γ основывается на том соображении, что при сильном насыщении ампервитки $AW_p = 0$, так как точка A (рис. 119) лежит на прямолинейной части за коленом кривой намагничивания.

При холостом ходе:

$$U = E_0,$$

где E_0 — электродвижущая сила, индуктированная в якоре при холостом ходе. Для поддержания напряжения $U = E_0$ при полной нагрузке необходимо иметь $E > E_0$, т. е. поток при нагрузке:

$$\Phi'_a > \Phi_a.$$

ГЛАВА V.

СОБИРАНИЕ ТОКА С КОЛЛЕКТОРА МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

1. Введение.

Вопрос собирания тока с коллектора машины постоянного тока для отвода этого тока во внешнюю цепь является кардинальнейшим в теории и практике машин.

Особое значение приобретает этот вопрос в связи со стремлением поднять напряжение и мощность машин. Естественно, что тот скользящий контакт, который получается в месте соприкосновения коллекторных пластин со щеткой, представляет собой слабое место машины. Необходимо обеспечить полную неизменяемость этого контакта с течением времени и отсутствие каких-либо вибраций, могущих вызвать перерыв контакта и, как следствие, искрение на коллекторе.

Надежность контакта между коллектором и щетками является необходимым, но далеко не достаточным условием безискрового снятия тока с коллектора. В случае снятия тока с контактного кольца надежность контакта, в соединении с удовлетворительным отводом тепла, выделяющегося в контакте, полностью обеспечивает безискровой съем тока. При наличии же коллектора вопрос осложняется тем, что щетка, помимо отвода тока, поступающего к ней от двух параллельных ветвей якоря, замыкает цепь для добавочного тока, получающегося в секции, замкнутой щеткой накоротко. Этот добавочный ток, накладываясь на основной, отдаваемый щеткой во внешнюю цепь, способствует неравномерному распределению тока под щеткой. Чрезмерная плотность тока, при условии достаточной разности потенциалов между щеткой и покидающей ее пластиной, ведет к образованию вольтовой дуги — искрению под щетками. Этим, однако, явление не всегда ограничивается. Возникшая вольтова дуга ионизирует окружающее коллектор пространство, вследствие чего слой воздуха, соприкасающийся с коллектором, оказывается также ионизованным. Если при этом разность потенциалов между щеткой и уходящей пластиной достаточно велика, то дуга может сохраниться не только после выхода пластины из-под щетки, но даже и тогда, когда между этой пластиной и щеткой окажется ряд

других пластин. Устойчивое горение дуги возможно вплоть до момента попадания исходной пластины под щетку следующей полярности. Вместе с пластиной дойдет до щетки противоположной полярности и вольтова дуга. В результате получится разряд между разноименными щеткодержателями — так называемый круговой огонь. Явление это весьма опасно как для якоря, так и для коллектора машины. Якорь оказывается замкнутым накоротко через дугу, и ток сильно возрастает. В результате коллектор и щетки обгорают вследствие высокой температуры дуги. После нескольких повторений кругового огня машина обычно выходит из строя и требует капитального ремонта.

Рассмотренный предельный случай, к которому может повести искрение на коллекторе, является, таким образом, весьма опасным для машины; искрение опасно и в том случае, если оно не переходит в круговой огонь. Поверхность коллектора и щеток становится неровной, получается быстрое изнашивание щеток, а иногда даже откалывание от них целых кусков; при таких условиях коллектор приходится часто протачивать для устранения неровностей и он быстро снашивается.

Губительные последствия искрения на коллекторе заставляют принимать всевозможные меры для обеспечения безискровой работы щеток. Принятие правильных мер основывается на глубоком изучении процессов, происходящих в контуре, замкнутом накоротко щеткой. Поэтому изучение процесса изменения тока в короткозамкнутом контуре (коммутации тока) должно предшествовать описанию мероприятий, обеспечивающих безискровое снятие тока с коллектора.

2. Коммутация тока при отсутствии в короткозамкнутой секции э. д. с.

а) Простейший случай — прямолинейная коммутация. Рассмотрим прежде наиболее простой из возможных случаев коммутации тока, а именно тот, который имеет место при отсутствии в короткозамкнутой секции э. д. с. Такими э. д. с. могут быть как индуцируемая полем машины, так и э. д. с. самоиндукции, получающаяся вследствие изменения тока. Предположим, поэтому, что переключение секций из одной параллельной ветви в другую идет настолько медленно, что э. д. с. самоиндукции ничтожна; поскольку последнее равносильно предположению весьма малой скорости вращения якоря, то и э. д. с., индуцированная внешним полем, пренебрежимо мала.

Рассматривая секцию, замкнутую накоротко щеткой (рис. 120), предположим, что якорь имеет кольцевую обмотку и что ширина щетки b_B равна ширине коллекторного деления t_k . Введем также следующие обозначения:

$I = 2i_a$ — ток через щетку, отдаваемый машиной во внешнюю сеть;

i_a — ток в параллельной ветви;

i_1, i_2 — токи в соединениях между рассматриваемой секцией и коллекторными пластинами, обозначенными теми же номерами;

i — ток в короткозамкнутой секции;

R_k — сопротивление контакта всей щетки;

r_1 и r_2 — сопротивления контакта набегающего и сбегающего края щетки;

t — время, протекшее от начала коммутации;

T — период коммутации;

F_1 — площадь набегающего края щетки;

F_2 — площадь сбегающего края щетки;

F_k — площадь всей щетки.

Коммутация данной секции S_1 начинается в тот момент, когда пластина коллектора, обозначенная нами 1, начинает соприкасаться со щеткой. В момент, предшествовавший этому, когда щетка перекрывала пластину 2, весь ток $2i_a = I$ протекал через соединенный с нею петушок. Рассматриваемая секция вела в это время ток i_a , как и все остальные. Когда щетка коснется пластины 1, появится ток в петушке пластины 1, и общий ток машины распределится между петушками в зависимости от сопротивлений r_1 и r_2 . Ток в секции S_1 уменьшится, так как часть тока из ветви с положительным (условно $+i_a$) его направлением попадет в щетку непосредственно через петушок 1. В момент, когда щетка перекроет равные части пластин 1 и 2, тока в секции S_1 не будет, так как в петушках 1 и 2 получатся токи, равные порознь току в параллельной ветви i_a . Далее, ток в секции S_1 должен будет изменить направление в связи с уменьшением площади контакта под пластиной 2 и увеличением его под пластиной 1. Ток в петушке 2 будет убывать, что неизбежно поведет к возрастанию тока в секции S_1 , причем ток этот будет иметь знак той ветви, куда переходит данная секция, т. е. противоположный бывшему там ранее. Наконец, в момент, когда щетка, отойдя от пластины 2, перекроет пластину 1, получим окончание процесса перехода тока — коммутации секции S_1 . Эта последняя будет вести ток $-i_a$, будучи переключена в другую параллельную ветвь. Итак, за время коммутации ток в секции изменится от значения его $+i_a$ до $-i_a$. Установим закон изменения этого тока.

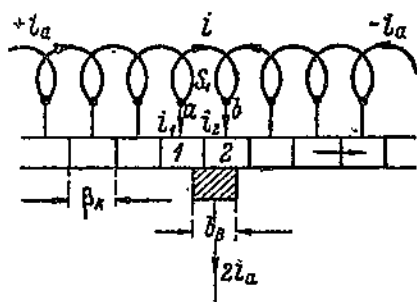


Рис. 120.

Рассмотрим замкнутый контур, состоящий из секции S_1 , петушков 1 и 2, коллекторных пластин 1 и 2 и щетки. Схема разветвления токов и размещения сопротивлений получает вид

рис. 121. Применяя для этой замкнутой цепи второй закон Кирхгофа, получим, пренебрегая величиной сопротивления секций и петушков по сравнению с r_1 и r_2 , следующее уравнение:

$$i_2 r_2 - i_1 r_1 = 0. \quad (103)$$

Согласно первому закону Кирхгофа, имеем для точек разветвления токов a и b в момент, непосредственно следующий за началом коммутации:

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= i_a - i, \\ i_2 &= i_a + i. \end{aligned} \right\} \quad (104)$$

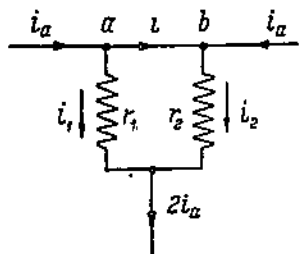


Рис. 121.

Исключая токи i_1 и i_2 из трех последних уравнений, получим:

$$i = i_a \frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2}. \quad (105)$$

Сопротивления r_1 и r_2 можно выразить через сопротивление контакта всей щетки R_k , время, протекшее от начала коммутации, t и период коммутации T , понимая под последним то время, в течение которого щетка перекрывает секцию. Действительно, отношение сопротивлений r_1 , r_2 и R_k зависит от отношения площадей соответствующих контактов: $\frac{r_1}{R_k} = \frac{F_k}{F_1}$; $\frac{r_2}{R_k} = \frac{F_k}{F_2}$; последние же изменяются в зависимости от времени согласно выражениям: $\frac{F_k}{F_1} = \frac{T}{t}$; $\frac{F_k}{F_2} = \frac{T}{T-t}$; отсюда можно написать:

$$r_1 = R_k \frac{T}{t}, \quad (106)$$

а также:

$$r_2 = R_k \frac{T}{T-t}. \quad (107)$$

Подставляя ур-ния (106) и (107) в ур-ние (105), получим выражение тока i в функции времени:

$$i = i_a \left(1 - \frac{2t}{T} \right). \quad (108)$$

Из последнего уравнения легко установить, что между i и t существует линейная зависимость (рис. 122).

Для построения прямой тока i имеем следующие три точки. При $t=0$, $i=i_a$, при $t=T/2$ получается $i=0$ и при $t=T$, $i=-i_a$. Итак, начальное значение тока $i=i_a$ лежит на оси ординат.

Прямая тока пересекает ось абсцисс в точке с абсциссой $t=T/2$. Каждая ордината прямой дает значение тока i для заданного момента времени. Из диаграммы рис. 122 могут быть также найдены токи $i_1 = i_a - i$ и $i_2 = i_a + i$. Первый из этих токов опре-

делится расстоянием по вертикали от прямой тока i до линии AA , проведенной параллельно оси абсцисс; второй — расстоянием по вертикали до прямой BB , проведенной параллельно той же оси.

То обстоятельство, что изменение тока секции в данных условиях идет по прямолинейному закону, весьма благоприятно, так как плотность тока по всей контактной поверхности щетки остается за время коммутации неизменной.

Выражение для плотности тока* может быть представлено в общем виде так:

$$j = \frac{i_x}{F_x}, \quad (109)$$

где i_x — ток через контактную поверхность F_x . Эта поверхность для набегающего края щетки может быть выражена так:

$$F_x = F_1 = l_B v_k t, \quad (110)$$

где: l_B — длина щетки в направлении оси машины, v_k — окружная скорость на коллекторе, t — время от начала коммутации.

Так как для набегающего края $i_x = i_1$, то в данном случае плотность тока:

$$j_1 = \frac{i_1}{t} = \frac{i_a - i}{t}, \quad (111)$$

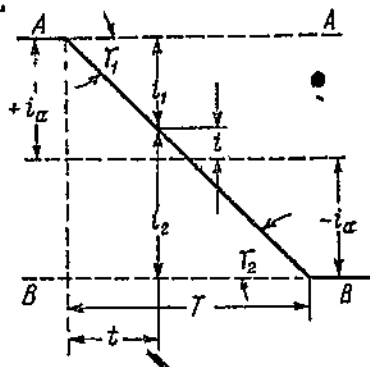


Рис. 122.

подобным же образом для сбегающего края плотность тока:

$$j_2 = \frac{i_2}{T-t} = \frac{i_a + i}{T-t}. \quad (112)$$

Из рис. 122 получим, вводя обозначение углов:

$$\operatorname{tg} \gamma_1 = \frac{i_a - i}{t} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \gamma_2 = \frac{i_a + i}{T-t}. \quad (113)$$

Ввиду того, что изменение тока идет здесь по прямой линии, имеем:

$$j = j_1 = j_2 = \operatorname{tg} \gamma = \operatorname{const}, \quad (114)$$

что и требовалось установить.

При постоянной плотности тока будут, очевидно, налицо все условия для хорошей коммутации, так как щетка нигде не будет перегружена чрезмерным током. Случай, рассмотренный нами, носит название прямолинейной коммутации и является таким, к которому следует всегда стремиться.

б) Коммутация с сопротивлением. Рассмотрим теперь процесс изменения тока в короткозамкнутой секции в том случае, когда сопротивления петушков (ρ) и самой секции (R_s) не равны нулю и соизмеримы по своей величине с сопротивлением контакта R_k . Такой случай может практически иметь место,

например, в том случае, когда петушки имеют повышенное сопротивление. Последнее применялось иногда в старых машинах в целях уменьшения искрения на коллекторе.

На основании закона Кирхгофа, в приложении к контуру рис. 123, получим тогда, полагая попрежнему сумму э. д. с.:

$$\sum e = 0;$$

$$i_2 r_2 - i_1 r_1 - i_1 \rho + i R_s + i_2 \rho = 0. \quad (115)$$

Подставляя выражения для сопротивлений r_1 и r_2 из равенств (106) и (107) и заменяя токи i_1 и i_2 согласно выражениям (104), имеем:

$$(i_a + i) R_k \frac{T}{T-t} - (i_a - i) R_k \frac{T}{t} - (i_a - i) \rho + i R_s + (i_a + i) \rho = 0,$$

$$\text{или } i(2\rho + R_s) - i_a R_k T \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{T-t} \right) + i R_k T \left(\frac{1}{t} + \frac{1}{T-t} \right) = 0.$$

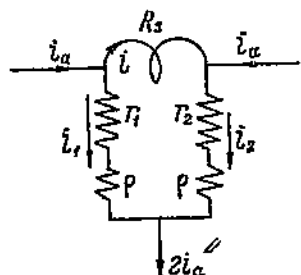


Рис. 123.

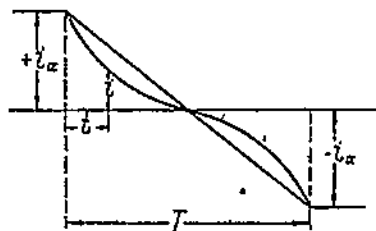


Рис. 124.

Обозначая:

$$2\rho + R_s = R,$$

имеем:

$$i \left[R + R_k T \frac{T}{t(T-t)} \right] = i_a R_k T \frac{T-2t}{t(T-t)},$$

откуда:

$$i = i_a \frac{R_k T \frac{T-2t}{t(T-t)}}{R + R_k T \frac{T}{t(T-t)}} = i_a \frac{R_k T \frac{T-2t}{t(T-t)}}{\frac{R}{R_k} \frac{T}{t(T-t)} + T} = i_a \frac{\left(1 - 2 \frac{t}{T} \right)}{\frac{R}{R_k} \frac{T}{t(T-t)} + 1}. \quad (116)$$

Кривая тока i , построенная по ур-нию (116), дана на рис. 124, здесь же показана прямая, соответствующая ур-нию (108). Последнее легко получается из (116) в том случае, если положить $R=0$. Имеем тогда:

$$i = i_a \left(1 - \frac{2t}{T} \right).$$

3. Коммутация тока в общем случае.

а) Приближенный анализ картины изменения тока. В нормальных условиях работы машин постоянного тока,

ввиду малой величины периода коммутации (T порядка $1/2000$ — $1/3000$ сек), изменение тока в короткозамкнутой секции происходит очень быстро, вследствие чего там всегда появляется э. д. с. самоиндукции:

$$e_s = -L \frac{di}{dt}, \quad (117)$$

где L — коэффициент самоиндукции.

Кроме того, обычно в коммутационной зоне имеется внешнее поле, созданное главными полюсами при сдвиге щеток с нейтральной линии или дополнительными полюсами при положении щеток на нейтрали. Обозначая эту э. д. с. через e_c , можем написать следующее выражение второго закона Кирхгофа для замкнутого щеткой контура, пренебрегая попрежнему величиной сопротивления секции и петушков:

$$i_2 r_2 - i_1 r_1 = e_c + e_s. \quad (118)$$

Уравнения (106) и (107) также остаются в силе. Исключая токи i_1 и i_2 из ур-ний (104) и (118), получим выражение для тока в секции:

$$i = i_a \frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2} + \frac{e_c + e_s}{r_1 + r_2}. \quad (119)$$

Это уравнение отличается от (105) наличием второго члена в правой части. Обозначая:

$$i_a \frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2} = i_i \quad \text{и} \quad \frac{e_c + e_s}{r_1 + r_2} = i_k,$$

получим:

$$i = i_i + i_k, \quad (119a)$$

причем i_i представляет ток, получающийся при прямолинейной коммутации, а i_k — добавочный ток, накладывающийся на прямолинейный и искажающий всю кривую перехода тока. Этот последний ток вызван разностью э. д. с. самоиндукции и внешнего поля. В случае, когда $i_k = 0$, имеем прямолинейную коммутацию. Очевидно, что та же коммутация может иметь место не только в теоретическом случае, рассмотренном нами ранее ($v_k = 0$), но и в реальном. Для этого необходимо, чтобы в любой момент в течение периода коммутации электродвижущая сила e_c компенсировала электродвижущую силу самоиндукции e_s . О возможности получить такую компенсацию было сказано в гл. IV, посвященной реакции якоря. Предполагая, что такой компенсации э. д. с. нет, сосредоточим свое внимание на втором члене ур-ния (119a) — токе i_k , и попытаемся выяснить характер его изменения за время T .

Обращаясь к сопротивлению короткозамкнутого контура:

$$r_k = r_1 + r_2 = R_k \frac{T}{t} + R_k \frac{T}{T-t}$$

и давая t различные значения, имеем:

$$\begin{aligned} 1) \quad t=0, & \quad r_k = \infty, \\ 2) \quad t = \frac{T}{2}, & \quad r_k = 4R_k, \\ 3) \quad t=T, & \quad r_k = \infty. \end{aligned}$$

Отсюда можно установить характер изменения тока i_k , если предположить, что э. д. с. самоиндукции e_s и внешнего поля e_c остаются за время коммутации неизменными. Что касается электродвижущей силы e_s , то такого рода предположение показывает, что нами принята зависимость ее лишь от тока i_l прямой коммутации. Для нахождения величины e_s возьмем, в соответствии с выражением (117), производную по времени от тока i_l , выражаемого уравнением (108). Получим:

$$e_{sl} = -L \frac{di_l}{dt} = -L \frac{d}{dt} \left[i_a \left(1 - \frac{2t}{T} \right) \right] = L \frac{2i_a}{T}. \quad (120)$$

Последнее равенство показывает, что э. д. с. самоиндукции положительна и неизменна за все время коммутации. Электродвижущая сила e_c будет оставаться постоянной в том случае, если поле в коммутационной зоне неизменно, как это обычно и бывает. Отметим, что e_c может иметь тот или иной знак по отношению к э. д. с. самоиндукции, в зависимости от положения щеток. Обычно щетки устанавливают так, чтобы e_c была направлена противоположно e_s . Приняв это положение щеток за нормальное, т. е. присвоив электродвижущей силе e_c знак минус, рассмотрим случай, когда:

$$e_s - e_c > 0.$$

На рис. 125, *a* дана кривая изменения сопротивления r_k за время коммутации. Кривая тока i_k нанесена для этого случая на рис. 125, *b*, тогда как ток i_l изменяется по прямой рис. 125, *c*. Суммируя ординаты кривых i_k и i_l , получим кривую I тока i в короткозамкнутой секции (рис. 125, *d*); этот ток изменяется уже не по прямой линии, а по некоторой кривой, уравнения которой мы выводить не будем, так как нас интересует пока лишь физический процесс.

Рассматривая кривую тока рис. 125, *d*, можем установить, что вследствие задержки, вызванной избытком э. д. с. самоиндукции, ток меняется в начале периода коммутации медленнее, чем при отсутствии в секции э. д. с. Так, при $t = \frac{T}{2}$ ток не успевает упасть до нуля и достигает этого значения значительно позже. Получается замедленная криволинейная коммутация. Основным недостатком такого протекания процесса является неравномерная плотность тока под щеткой, достигающая особенно больших значений на сбегающем ее краю.

Ввиду того, что для любого момента времени в течение периода коммутации плотности токов под сбегающим и набегающим краями щетки даются выражениями (111) и (112), плот-

ность тока для криволинейной коммутации изобразится тангенсом угла уклона к оси абсцисс прямых OM и $O'M$, проведенных из начальной и конечной точек кривой в рассматриваемую точку кривой тока, соответствующую данному моменту времени (рис. 125, *д*). Как видно из рис. 126, плотность тока изменяется различно для сбегающего и набегающего краев щетки. В момент, когда щетка перекрывает лишь одну пластину ($t=0$), плотность тока принимает значение j_{mod} . Вслед за прикосновением набегающего края к следующей пластине плотность тока на нем немедленно падает до величины j_{min} , после чего постепенно возрастает до прежней величины j_{mod} в конце периода, при $t=T$. Под сбегающим краем, наоборот, вслед за началом коммутации происходит увеличение плотности тока до величины j_{max} в конце периода коммутации, при $t=T$. После размыкания тока между сбегающим краем и уходящей от него пластиной получается падение плотности тока до нуля.

Наибольшая плотность тока получается в данных условиях под сбегающим краем щетки в конце периода коммутации. Эта плотность может быть определена, согласно сказанному выше; тангенсом угла уклона к оси абсцисс касательной к кривой тока в конечной ее точке ($tg\gamma_2$). Точно так же плотность тока в начальной точке кривой изобразится тангенсом угла наклона к оси абсцисс, касательной к этой точке ($tg\gamma_1$). При этом чем больше будет замедление коммутации, тем круче начнет опускаться кривая тока i к конечной своей точке, а следовательно, тем больше будет $tg\gamma_2$ и величина плотности тока j_2 .

Рассмотрим теперь случай, когда:

$$e_s - e_c < 0,$$

т. е. электродвижущая сила, индуктированная в секции внешним полем, преобладает над э. д. с. самоиндукции. В этом случае кривая добавочного тока i_k получит изгиб в противоположную сторону (рис. 125, *б*) и результирующая кривая тока i будет иметь вид пунктирной кривой II рис. 125, *д*. Как видно,

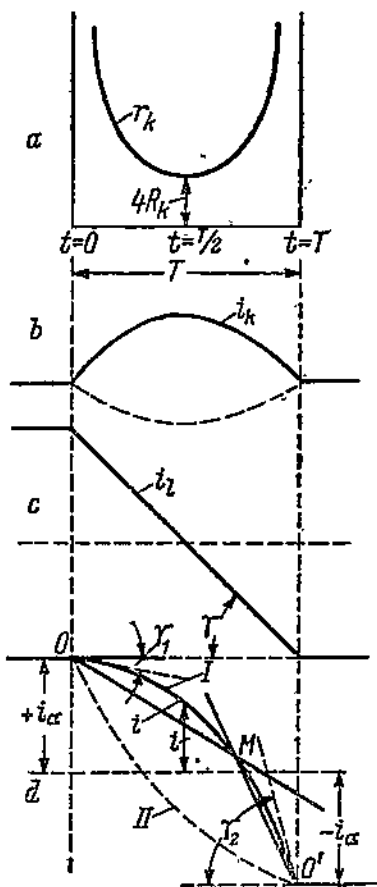


Рис. 125.

получается не замедление, а ускорение коммутации, так как кривая тока переходит через свое нулевое значение раньше времени $t = T/2$.

На основании изложенного мы можем установить, что наибольшей величины плотность тока достигает под набегающим краем щетки в начальный момент коммутации, так как $\text{tg } \alpha$ имеет здесь наибольшую величину.

б) Точный анализ картины изменения тока. Общее уравнение Кирхгофа для контура, замкнутого накоротко щеткой, имеет, согласно ур-нию (118), следующий развернутый вид:

$$e_c - L \frac{di}{dt} = (i_a + i) R_k \frac{T}{T-t} - (i_a - i) R_k \frac{T}{t}. \quad (121)$$

Разложим, попрежнему, ток i на составляющие, из коих одна (i_l) соответствует прямолинейной коммутации и другая (i_k) представляет собой добавочный ток. Соответственно разложим э. д. с. e_c на составляющую e_l , которая удовлетворяет условию:

$$e_l - L \frac{di_l}{dt} = 0,$$

и добавочную э. д. с. e_k , удовлетворяющую равенству:

$$e_k = e_c - e_l = e_c - L \frac{di_l}{dt}.$$

Напишем общее уравнение коммутации в разложенном на составляющие виде:

$$(e_l + e_k) - L \frac{di_l}{dt} - L \frac{di_k}{dt} = \\ = (i_a + i_l + i_k) R_k \frac{T}{T-t} - (i_a - i_l - i_k) R_k \frac{T}{t}.$$

Для составляющих, определяющих прямолинейную часть процесса, будем иметь уравнение:

$$e_l - L \frac{di_l}{dt} = (i_a + i_l) R_k \frac{T}{T-t} - (i_a - i_l) R_k \frac{T}{t}.$$

Поскольку

$$e_l - L \frac{di_l}{dt} = 0,$$

то:

$$i_l = i_a \left(1 - \frac{2t}{T}\right).$$

Ввиду этого получаем для добавочного тока i_k и добавочной э. д. с. e_k следующее дифференциальное уравнение:

$$e_k - L \frac{di_k}{dt} = i_k R_k T \left(\frac{1}{t} + \frac{1}{T-t} \right). \quad (122)$$

Введем обозначения:

$$\frac{t}{T} = x; \quad dt = Tdx.$$

Уравнение (122) может быть тогда представлено в следующем виде:

$$\frac{dt_k}{dx} + i_k \frac{R_k T}{L} \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{1-x} \right) - e_k \frac{T}{L} = 0.$$

В общем случае э. д. с. e_k может быть некоторой функцией от x . Имеем:

$$e_k \frac{T}{L} = \varphi(x).$$

С другой стороны, выражение:

$$\frac{R_k T}{L} \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{1-x} \right) = f(x)$$

есть также функция от x .

Имеем, таким образом, дифференциальное уравнение вида:

$$\frac{dt_k}{dx} + i_k f(x) - \varphi(x) = 0. \quad (123)$$

Для решения этого уравнения полагаем:

$$i_k = uv,$$

тогда:

$$\frac{dt_k}{dx} = u \frac{dv}{dx} + v \frac{du}{dx}.$$

Подставляя в ур-ние (123), имеем:

$$u \frac{dv}{dx} + v \frac{du}{dx} + uv f(x) - \varphi(x) = 0$$

или

$$u \frac{dv}{dx} + v \left[\frac{du}{dx} + u f(x) \right] - \varphi(x) = 0.$$

Выбираем переменную u таким образом, чтобы:

$$\frac{du}{dx} + u f(x) = 0,$$

откуда

$$\frac{du}{u} + f(x) dx = 0;$$

интегрируя, имеем:

$$\int \frac{du}{u} + \int f(x) dx - \ln C_1 = 0,$$

что дает:

$$\ln u = - \int f(x) dx + \ln C_1;$$

$$\ln \frac{u}{C_1} = - \int f(x) dx;$$

$$u = C_1 e^{-\int f(x) dx}.$$

Значение v найдем, положив:

$$u \frac{dv}{dx} - \varphi(x) = 0,$$

откуда:

$$dv = \frac{\varphi(x) dx}{u} = \frac{\varphi(x) dx}{C_1 e^{-\int f(x) dx}}$$

и

$$v = \int \frac{\varphi(x)}{C_1} e^{\int f(x) dx} \cdot dx + C_2.$$

Значение тока i_k найдем теперь как:

$$i_k = uv = C_1 e^{-\int f(x) dx} \left[\int \frac{\varphi(x)}{C_1} e^{\int f(x) dx} \cdot dx + C_2 \right]. \quad (124)$$

Подставляя вместо $f(x)$ и $\varphi(x)$ их значения, получим:

$$i_k = C_1 e^{-\int \frac{R_k T}{L} \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{1-x} \right) dx} \left[\int \frac{e_k T}{L C_1} e^{\int \frac{R_k T}{L} \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{1-x} \right) dx} \cdot dx + C_2 \right].$$

Обозначим:

$$\frac{R_k T}{L} = A$$

и преобразуем отдельные члены выражения тока i_k .

Имеем:

$$\begin{aligned} e^{-\int A \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{1-x} \right) dx} &= e^{-\int A \frac{dx}{x} + \int A \frac{d(1-x)}{1-x}} = e^{-A [\ln x - \ln (1-x)]} = \\ &= e^{-A \ln \frac{x}{1-x}} = e^{\ln \left(\frac{x}{1-x} \right)^{-A}} = \left(\frac{x}{1-x} \right)^{-A}; \end{aligned}$$

соответственно:

$$e^{\int A \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{1-x} \right) dx} = \left(\frac{x}{1-x} \right)^A.$$

Подставляя в уравнение тока i_k , имеем:

$$i_k = C_1 \left(\frac{x}{1-x} \right)^{-A} \left[\int \frac{e_k T}{L C_1} \left(\frac{x}{1-x} \right)^A dx + C_2 \right] = \\ = C_1 \left(\frac{x}{1-x} \right)^{-A} \left[\int \frac{e_k}{R_k C_1} A \left(\frac{x}{1-x} \right)^A dx + C_2 \right].$$

Для определения постоянных переписываем последнее уравнение так:

$$i_k \left(\frac{x}{1-x} \right)^A = \int \frac{e_k}{R_k} A \left(\frac{x}{1-x} \right)^A dx + C.$$

Имеем начальные условия:

$$t = 0; \quad x = 0; \quad i_k = 0.$$

Если:

$$A > 0,$$

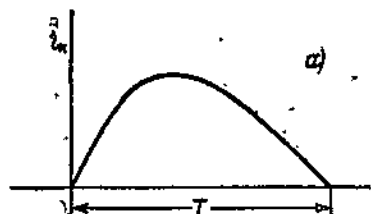


Рис. 127, а.

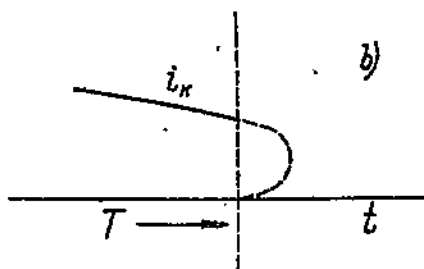


Рис. 127, б.

то подынтегральная функция, так же как и левая часть последнего уравнения, обращаются в нуль. Имеем тогда:

$$C = 0.$$

Окончательное выражение для тока получается:

$$i_k = \left(\frac{x}{1-x} \right)^{-A} \int_{x=0}^{x=x} \frac{e_k}{L} T \left(\frac{x}{1-x} \right)^A dx. \quad (125)$$

Последняя формула дает возможность получить выражение для тока i_k , если известна зависимость:

$$e_k = f(x).$$

Графическое интегрирование уравнения (125) позволяет это легко сделать. На рис. 127, а дана кривая добавочного тока, рассчитанная таким методом.

Для практики электромашиностроения представляет, однако, наибольший интерес не сама кривая тока, а те значения плотностей тока, которые наблюдаются на сбегающем и набегающем краях щетки. Найдем эти плотности тока. Рассмотрим первоначально момент размыкания тока. Обращаемся вновь к основному ур-нию (122). Имеем:

$$L \frac{di_k}{dt} + i_k R_k T \left(\frac{1}{t} + \frac{1}{T-t} \right) = e_k.$$

Если размыкание секции совершается без образования искры, то ток i_k должен стать равным нулю в момент $t = T$. Для предшествующих моментов, весьма близких к $t = T$, можно считать, что ток i_k изменяется по закону прямой линии. Последнее предположение дает право написать (рис. 127, а):

$$-\frac{di_k}{dt} = \frac{i_k}{T-t},$$

после чего ур-ние (122) переписывается так:

$$-L \frac{i_k}{T-t} + R_k i_k + R_k i_k \frac{T}{T-t} = e_k; \quad (126)$$

так как при $t = T$ имеем: $\frac{T}{t} = 1$.

Получаем далее:

$$R_k i_k = 0,$$

так как, кроме того, при $t = T$ имеем: $i_k \cong 0$.

Обозначим, кроме того:

$$i_k R_k \frac{T}{T-t} = e_R,$$

где e_R есть падение напряжения между щеткой и коллекторной пластиной.

Подставляя в ур-ние (126), имеем:

$$-e_R \frac{L}{R_k T} + e_R = e_k,$$

что дает:

$$e_R = \frac{e_k}{1 - \frac{L}{R_k T}} = \frac{e_k}{1 - \frac{1}{A}}. \quad (127)$$

При: $A > 1$ имеем положительное значение e_R ,

$A = 1$ имеем $e_R = \infty$,

$A < 1$ имеем e_R равной отрицательной величине.

Последний случай ($A < 1$) дает, однако, при $T = t$:

$$i_k \neq 0,$$

в чем можно убедиться, построив кривую согласно ур-нию (125).
В этом случае нельзя исходить из соотношения:

$$-\frac{di_k}{dt} = \frac{i_k}{T-t},$$

так как изменение тока при подходе к моменту $t = T$ соответствует рис. 127, *b*. Ток будет иметь конечную и, может быть, весьма значительную величину в момент $t = T$.

Обращаясь к добавочной плотности тока на сбегавшем краю, имеем:

$$j_{2k} = \frac{i_{2k}}{F_2} = \frac{e_R}{R_k \frac{T}{T-t} F_2} = \frac{e_k}{R_k F_2 \left(\frac{T}{T-t} \right) \left(1 - \frac{1}{A} \right)}.$$

Так как:

$$F_2 = F_k \frac{T-t}{T},$$

то имеем:

$$j_{2k} = \frac{e_k}{R_k F_k \left(1 - \frac{1}{A} \right)} = \frac{e_k}{\left(1 - \frac{1}{A} \right) R_n}, \quad (128)$$

где $R_n = R_k F_k$ есть удельное переходное сопротивление контакта щетки.

Очевидно, что при $A = 1$ имеем $j_{2k} = \infty$. То же получается и при $A < 1$, так как тогда, согласно рис. 127, *b*, ток имеет конечную величину при $t = T$, а $F_2 = 0$. Отсюда очевидно, что единственным условием, при котором плотность тока на сбегавшем краю щетки получает конечное значение, является:

$$A > 1, \quad (129)$$

каковое выражение и определяет предел коммутлирующей способности машины.

Представив это выражение в несколько ином виде, имеем:

$$A = \frac{R_k l'}{L} > 1 \text{ или } R_k > \frac{L}{l'};$$

умножая на ток, проходящий через щетку:

$$I = 2i_a,$$

имеем:

$$2i_a R_k > L \frac{2i_a}{l'}$$

или

$$e_{Rl} > e_{sl}, \quad (130)$$

что словами можно выразить так: для удовлетворительного течения коммутационного процесса необходимо, чтобы среднее значение падения напряжения под щеткой было больше среднего значения э. д. с. самоиндукции.

Обратимся теперь к набегающему краю щетки. Имеем на основании ур-ния (122) для момента t , близкого к нулю, следующее выражение:

$$L \frac{i_k}{t} + i_k R_k + i_k R_k \frac{T}{t} = e_k,$$

причем здесь предположено, что:

$$\frac{di_k}{dt} = \frac{i_k}{t}$$

вследствие прямолинейности кривой тока в начальной ее части. Замечая, что:

$$i_k R_k \frac{T}{t} = e_R,$$

получим уравнение:

$$e_R \frac{L}{R_k T} + e_R = e_k,$$

откуда найдем:

$$e_R = \frac{e_k}{1 + \frac{1}{A}}. \quad (131)$$

Для добавочной плотности тока на набегающем краю будем иметь выражение:

$$j_{1k} = \frac{i_k}{F_1} = \frac{i_k}{F_k \frac{t}{T}} = \frac{e_k}{\left(1 + \frac{1}{A}\right) R_u}, \quad (132)$$

откуда усматриваем, что плотность тока на набегающем краю не получает при $A=1$ бесконечно большого значения. Образование искрения на набегающем краю менее вероятно, поэтому, чем на сбегающем.

4. Причины коммутационного искрения и критерий для безискровой коммутации.

Теоретическое рассмотрение условий перехода тока в короткозамкнутой щеткой секции дало возможность установить неравно-

мерное распределение тока под щеткой при наличии в секции э.д.с. Это рассмотрение позволило также установить характер кривой добавочного тока в секции и дало критерий (129). Все рассмотрение свелось, в конечном счете, к анализу плотности тока на краях щетки, как к основному фактору, влияющему на течение процесса коммутации.

Обратив на это внимание, Торобурн Рейд высказал предположение, что причина искрения под щетками кроется именно в чрезмерной плотности тока под набегающим или сбегающим краями щетки. Однако опыты Арнольда и Иордана показали, что теория Рейда неверна и одной чрезмерной плотности тока недостаточно для образования искры. Последняя может возникнуть лишь тогда, когда между краем щетки и коллекторной пластиной имеется определенная разность потенциалов, и чем больше плотность тока на этом краю, тем меньшую разность потенциалов необходимо иметь для возникновения искрения. Следовательно искрение под щеткой требует для своего возникновения определенной плотности энергии. Особенно способствует этому разрыв значительного тока между коллекторной пластиной и сбегающим краем щетки при замедлении коммутации.

Электродвижущая сила самоиндукции вследствие резкого изменения тока возрастает здесь скачком, превышая во много раз среднее свое значение, соответствующее прямолинейной коммутации. Она может создать значительную разность потенциалов и в результате наличия разогретого при большой плотности тока края щетки поведет к образованию искры. Такое объяснение причины искрения представляется наиболее вероятным и заставляет привести, помимо критерия $A > 1$, еще и такой критерий, который позволил бы установить то предельно допустимое значение „плотности энергии“, выделяющейся на сбегающем краю щетки, при котором не появляется искрения.

Среднее значение электромагнитной энергии, которая освобождается в $2p$ -полюсной машине с 1 см длины щетки, может быть найдено следующим образом.

За время сдвига коллектора на одну пластину (период коммутации)

$$T = \frac{t_k}{v_k},$$

где t_k — коллекторное деление.

При $2p$ щетках выделяющаяся энергия:

$$W = \frac{1}{2} i_{k_{\max}}^2 L_R 2p,$$

где: $i_{k_{\max}}$ — наибольшее значение добавочного тока, L_R — коэффициент самоиндукции коммутируемой секции.

Общая длина щеток всех $2p$ щитфов будет:

$$2pl_D.$$

Отсюда мощность, приходящаяся на 1 см длины щетки:

$$P_f = \frac{1}{2} \frac{i_{k\max}^2 L_R v_k}{l_B t_k}. \quad (133)$$

Согласно Арнольду, эта мощность должна быть меньше 50 W, т. е.

$$P_f = \frac{1}{2} \frac{i_{k\max}^2 L_R v_k}{l_B t_k} \leq 50 \text{ W}. \quad (134)$$

Очевидно, что для вычисления P_f необходимо уметь определять как величину $i_{k\max}$, так и L_R .

Для определения $i_{k\max}$ обращаемся к уравнению (122). Приравнявая:

$$L \frac{di_k}{dt} = 0,$$

имеем:

$$i_{k\max} = \frac{e_k}{R_k T \left(\frac{1}{t} + \frac{1}{T-t} \right)}. \quad (135)$$

Полагая, с некоторым приближением, что максимум тока наступает при

$$t = \frac{T}{2},$$

имеем:

$$i_{k\max} = \frac{e_k}{4R_k}.$$

Ввиду приближения, принятого нами при определении момента максимума тока, введем (рис. 128) некоторый поправочный коэффициент k_t , данный Арнольдом. В соответствии с этим получим:

$$i_{k\max} = \frac{e_k}{4k_t R_k}. \quad (136)$$

На рис. 128 дана кривая:

$$k_t = f(A).$$

Что же касается коэффициента самоиндукции L_R , то его расчет дадим в дальнейшем, при определении э. д. с. самоиндукции.

Формула (134) даст, казалось бы, надежный критерий для суждения об условиях коммутации тока. Следует, однако, отметить малую надежность расчетов, производимых с ее помощью. Действительно, предельная величина мощности $P_f = 50 \text{ W}$ получилась в результате ряда наблюдений за безискровой работой коллектора. Между тем, понятие безискровой работы является достаточно растяжимым и зависит в значительной степени от

индивидуального суждения лиц, производивших наблюдения. Указывая на это, Арнольд считает, что критерий (134) хотя и следует из верных физических предпосылок, но грешит большой неточностью. Вследствие этого практически редко пользуются соотношением (134), а ведут проверку коммутации, исходя прямо из значения той э. д. с. e_k , которая индуцируется в короткозамкнутой секции. Ведь, в конечном счете, именно эта э. д. с. создает добавочный ток, являющийся одной из основных причин искрения.

В машинах без добавочных полюсов подсчет, а в особенности опытное определение э. д. с. e_k довольно затруднительны, ввиду чего оценку коммутации ведут, руководствуясь допустимыми значениями электродвижущей силы e_s , полученными на основе надежных опытных данных.

Так, в случае машин без добавочных полюсов берут при установке щеток на геометрической нейтрали:

$$e_s \leq 2 \text{ V.}$$

Однако более надежным значением e_s является:

$$e_s \leq 1 \text{ V.}$$

При установке щеток в сдвинутом с нейтрали положении, отвечающем наилучшим условиям коммутации при средней нагрузке, можно принять, как максимум:

$$e_s \leq 3,5 \text{ V.}$$

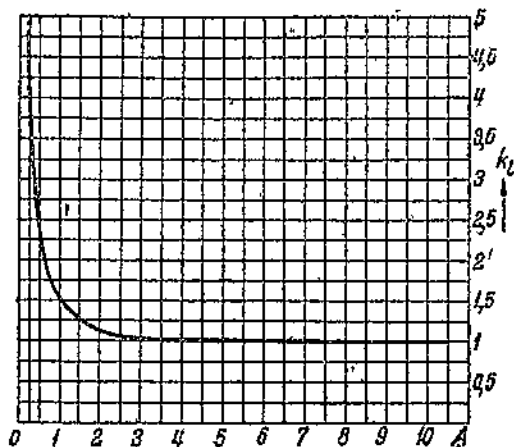


Рис. 128.

В случае применения в машине добавочных полюсов значение электродвижущей силы e_s может быть значительно больше и ограничивается уже не условиями коммутации тока, а скорее предельным возможным использованием материала машины. В этом случае можно добиться практически полной компенсации электродвижущей силы e_k путем соответствующего расчета добавочного полюса, хотя и здесь имеем определенный предел, причины которого будут пояснены в дальнейшем при рассмотрении так называемых кривых подпитки.

5. Вычисление э. д. с. самоиндукции (реактивной э. д. с.).

Из предыдущего видно, что знание зависимости электродвижущей силы e_s от основных величин, определяющих раз-

меры и электрические свойства машины, необходимо во всех случаях. Для вывода выражения e_s исходим из ф-лы (120):

$$e_s = L \frac{2i_a}{T}.$$

Первый множитель этого выражения — коэффициент самоиндукции L — определяет число сцеплений, образованных проводниками данной катушки с собственным полем при прохождении по ней тока в 1 А. Вследствие этого можно написать:

$$L = \sum w_x \Phi_x 10^{-8} \text{ генри} \quad (137)$$

или, согласно закону магнитной цепи:

$$L = \sum w_x \frac{0,4\pi w_x}{R_x} 10^{-8} = 0,4\pi 10^{-8} \sum \frac{w_x^2}{R_x} \text{ генри.} \quad (138)$$

Величина $\frac{1}{R_x} = \Delta_x$ есть проводимость для магнитных линий, созданных витками w_x .

Заменяем далее:

$$\sum w_x^2 \Delta_x = w_k^2 \sum \Delta_x,$$

где $\sum \Delta_x$ есть проводимость для всего поля, окружающего катушку (в данном случае короткозамкнутую секцию), и w_k — число короткозамкнутых витков.

Ввиду того что секции якоря частично расположены во впадинах (ведом вычисление L применительно к зубчатому якорю с барабанной обмоткой), частично же вне железа (лобовые части обмотки), можно написать:

$$\sum \Delta_x = 2\lambda_f + 2\lambda_s,$$

где: λ_f и λ_s — проводимости, приходящиеся на единицу длины проводника в железе и воздухе, а l и l_s — соответствующие длины половины секции. Подставляя в выражение (138), имеем:

$$L = 0,4\pi 10^{-8} 2w_k^2 (l\lambda_f + l_s\lambda_s) \text{ генри.} \quad (139)$$

Во впадине зубчатого якоря, кроме стороны рассматриваемой короткозамкнутой секции, лежит почти всегда сторона второй секции, замыкаемой накоротко щеткой другой полярности. Эти стороны секций настолько тесно связаны, что почти все линии, созданные током в стороне секции, охватывают другую (рис. 129). Вследствие этого необходимо учитывать также увеличение электродвижущей силы самоиндукции, обусловленное током в соседней секционной стороне. Так как взаимная индукция сторон имеет место лишь во впадине, можем вести учет, вводя коэффициент 2 в выражение проводимости потока в железе, после чего нетрудно получить выражение для полного коэффициента самоиндукции короткозамкнутой секции:

$$L_R = 2w_k^2 \left(2\lambda_f + \frac{l_s}{l} \lambda_s \right) 0,4\pi 10^{-8} \text{ генри} \quad (140)$$

или, вводя обозначение:

$$\zeta = 0,4\pi \left(2\lambda_f + \frac{l_s}{l} \lambda_s \right),$$

получим:

$$L_R = 2w_k^2 \zeta 10^{-8} \text{ генри.} \quad (141)$$

Как показали опыты Пихельмайера, величина ζ находится в нормальных машинах в пределах, близких к 10, ввиду чего можно последнее выражение написать приближенно так:

$$L_R = 2w_k^2 l 10^{-7} \text{ генри.} \quad (142)$$

Обращаясь опять к выражению электродвижущей силы e_s и подставляя значение $L = L_R$, имеем:

$$e_s = L_R \frac{2i_a}{T} = 2w_k^2 \zeta 2i_a \frac{1}{T} 10^{-8} \text{ вольт.} \quad (143)$$

Так как

$$T = \frac{b_B}{v_k},$$

где $v_k = \frac{\pi D n}{60}$ и $b_B = t_k =$

$$= \frac{\pi D k}{K}, \text{ имеем:}$$

$$T = \frac{60}{nK}. \quad (144)$$

Подставляя это выражение в равенство (143) и заметив, что

$$w_k = \frac{N}{2K},$$

имеем:

$$e_s = 2w_k \frac{N}{2K} \zeta \frac{nK}{60} 2i_a \frac{\pi D}{\pi D} 10^{-8} = 2w_k \frac{\pi D n N i_a}{60} \zeta 10^{-8} \text{ вольт}$$

или окончательно:

$$e_s = 2w_k v A S \zeta 10^{-8} \text{ вольт,} \quad (145)$$

где: v — окружная скорость якоря см/сек, AS — линейная нагрузка.

Вычисленная при помощи этой формулы электродвижущая сила носит часто название „реактивной“ ввиду того, что она создана не только самоиндукцией данной короткозамкнутой секции, но и реактивным влиянием соседней.

Все рассмотрение коммутации мы вели до сих пор в предположении $b_B = t_k$, принимая всего лишь две секционные стороны во впадине ($s_n = 2$). В практических условиях приходится, почти как правило, отступать от обоих условий. Вследствие увеличения числа перекрываемых одновременно щеткой коллекторных пластин изменяется период коммутации. Принятие $s_n > 2$

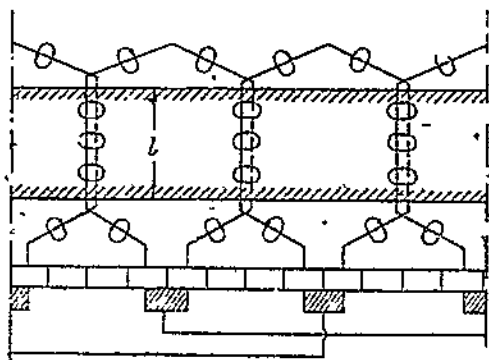


Рис. 129.

ведет к взаимному сцеплению полей ряда сторон секций, находящихся во впадине.

Таким образом на каждую секцию во время коммутации при ее коротком замыкании действует, кроме э. д. с. самоиндукции, еще э. д. с. взаимной индукции, индуктированная изменением тока в тех секциях, которые заложены в том же пазу и находятся в процессе коммутации одновременно с данной секцией.

Если имеем в пазу n секций, то результирующая э. д. с. взаимной индукции от всех секций равна:

$$e_{\Sigma} = - \frac{d(M_{12}i_2)}{dt} - \frac{d(M_{13}i_3)}{dt} \dots - \frac{d(M_{1n}i_n)}{dt}.$$

Можно принять, что:

$$M_{12} = M_{13} = \dots = M = \text{const.}$$

Тогда:

$$e_{\Sigma} = -M \left(\frac{di_2}{dt} + \frac{di_3}{dt} + \dots + \frac{di_n}{dt} \right).$$

Если бы секции вступали в процесс коммутации одновременно, то при прямолинейной коммутации:

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{di_2}{dt} = \dots = \frac{di_n}{dt}.$$

В этом случае результирующая э. д. с. самоиндукции и взаимной индукции получится:

$$e_r = e_s + e_{\Sigma} = -(L + \Sigma M) \frac{di}{dt} = -L'_R \frac{di}{dt}, \quad (146)$$

где L'_R — результирующий коэффициент самоиндукции.

В действительности, секции обмотки, лежащие в одном и том же пазу, присоединены одна за другой к ряду коллекторных пластин, ввиду чего в процессе коммутирования они вступают в последовательном порядке.

Для получения результирующей индуктивности при различных положениях секций в зоне коммутации можно по методу Рихтера складывать проводимости самоиндукции и взаимной индукции для проводников, находящихся в одном пазу, принимая во внимание сдвиг во времени начала и конца периода коммутации каждой секции.

Рассмотрим для примера случай, когда в пазу имеем $s_n = 8$ секционных сторон при перекрытии пластин щетками:

$$\beta = \frac{b_R}{t_k} = 2,5.$$

Предположим, что обмотка имеет диаметральный шаг ($\epsilon = 0$). Результирующая пазовая проводимость получится тогда путем сложения ординат четырех прямоугольников, представляющих собой проводимость потока самоиндукции для каждой из секций паза. Основание этих прямоугольников равно периоду коммутации T , а сдвиг между ними соответствует времени прохождения одного коллекторного деления (рис. 130).

Во время прохождения через период коммутации в первой секции индуцируется результирующая э. д. с., пропорциональная проводимости поля, сцепленного с ней (рис. 130, *a*). Во второй секции имеем запаздывание процесса на время, соответствующее перемещению коллектора на одно коллекторное деление. Кривая э. д. с. будет иметь вид рис. 130, *b*. Для третьей секции имеем кривую рис. 130, *c* и, наконец, для четвертой—кривую рис. 130, *d*. Проводники лежащие в одном пазу, оказываются в различных коммутационных условиях.

Из сказанного видно, что, если при прямолинейном течении процесса коммутации

$$\frac{di}{dt} = \text{const},$$

то величина э. д. с. самоиндукции:

$$e_r = e_s + e_{\text{ж}} = -L'_R \frac{di}{dt} \neq \text{const}$$

вследствие изменения коэффициента самоиндукции L'_R в течение периода коммутации. При этом изменения L'_R будут идти различно для разных секций вследствие неодинакового расположения их в пазу.

Можно представить реактивную э. д. с. e_r как получающуюся в результате пересечения короткозамкнутой секцией некоторого неподвижного в пространстве поля, имеющего индукцию B_R и находящегося в коммутационной зоне.

При прямолинейной коммутации можно написать:

$$e_r = -L'_R \frac{di}{dt} = K \lambda_R \frac{di}{dt} = K' B_R v,$$

где: K и K' —коэффициенты пропорциональности, λ_R —результатирующая проводимость, v —скорость движения проводника.

При $v = \text{const}$ и $\frac{di}{dt} = \text{const}$,

имеем:

$$L'_R = \lambda_R = B_R.$$

Ввиду того что L'_R и соответствующая ей λ_R являются переменными величинами, то и B_R должно меняться в пространстве вдоль коммутационной зоны по тому же закону, как меняются L'_R и λ_R во времени.

Для получения прямолинейной коммутации необходимо, чтобы реактивная э. д. с. e_r была уничтожена направленной ей на-

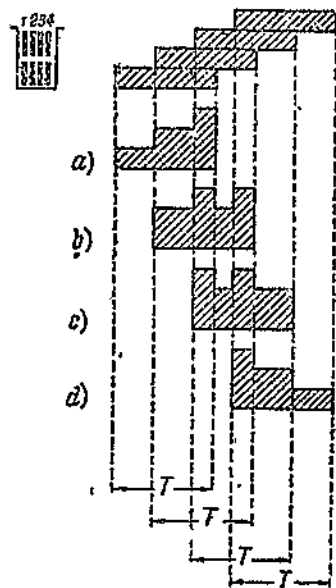


Рис. 130.

встречу э. д. с. e_c , индуцированной внешним полем в зоне коммутации, т. е. надо, чтобы:

$$e_c - L_R \frac{di}{dt} = 0.$$

Если же исходить из картины реактивного поля в зоне коммутации, то необходимо уничтожить его с помощью, имеющего такое же пространственное распределение, но обратного направленного поля B_c , т. е. надо, чтобы в каждой точке коммутационной зоны:

$$B_R = B_c.$$

Отсюда следует, что форма коммутирующего поля должна иметь такой же вид, как и форма поля реактивного.

Если получить точное совпадение форм кривых реактивного и коммутирующего полей достаточно трудно, то можно все же добиться, хотя бы того, чтобы средние значения этих полей были равны.

Точный учет влияния ширины щетки, а также числа одновременно коммутируемых сторон впадины, как видно, весьма сложен. Практически можно лишь указать, что увеличение ширины щетки вызывает некоторое уменьшение среднего значения э. д. с. самоиндукции. Действительно, при увеличении ширины щетки хотя и возрастает число одновременно перекрываемых секций и их взаимное влияние, но вместе с тем увеличивается и период коммутации.

Взаимное влияние секций сказывается лишь до тех пор, пока последние находятся в одном пазу. Поэтому увеличение ширины щетки до такого значения, когда одновременно перекрываемыми оказываются секции, лежащие в разных пазах, дает уменьшение э. д. с. самоиндукции. Период коммутации увеличивается, а взаимная индукция растет медленнее его. Расчет по ф-ле (145) даст, поэтому, в этом случае заведомо большее значение, что обуславливает определенный запас.

Отметим, что в случае применения последовательной обмотки расчетное значение реактивной э. д. с. необходимо увеличить в p раз, так как при плохом контакте некоторых щеток с коллектором получается p последовательно соединенных секций в контуре, замкнутом накоротко другими щетками. В этом легко убедиться, если в схеме последовательной обмотки, снабженной $2p$ щеточными комплектами, убрать все щетки, кроме двух, различной полярности.

6. Средства для улучшения коммутации.

а) Общие соображения. Машина постоянного тока, выполненная вполне нормально без каких бы то ни было средств для улучшения коммутации, требует такого расчета при ее изготовлении, чтобы величина электродвижущей силы e , не превосходила значений, указанных выше. Очень часто, однако, вследствие высокой скорости вращения (велико ω), задаваемой

первичным двигателем, или значительной величины напряжения (возрастает w_k), а также габаритных размеров (увеличивается ΔS для сокращения размеров магнитной цепи), не удастся получить значения э. д. с. реакции, необходимого для удовлетворительной коммутации. Тогда приходится применять какое-либо искусственное средство для улучшения коммутации с целью ослабления дополнительного тока i_k , созданного этой электродвижущей силой.

Рассматривая выражение для этого дополнительного тока:

$$i_k = \frac{e_s + e_c}{r_1 + r_2},$$

видим, что вредное влияние э. д. с. самоиндукции может быть уничтожено созданием соответствующей электродвижущей силы e_c , индуктированной внешним полем. Далее можно установить, что увеличением знаменателя этого выражения также можно понизить значение тока i_k . Последнее может быть осуществлено путем введения в короткозамкнутый контур добавочного сопротивления. Таким образом приходим к двум основным средствам улучшения коммутации: 1) введению в короткозамкнутый контур добавочных сопротивлений, 2) индуктированию в этом контуре электродвижущей силы e_c , направленной навстречу e_s .

Последний способ в практическом осуществлении распадается на два: а) создание e_c путем сдвига щеток из нейтральной линии, б) создание e_c помощью дополнительных полюсов.

Отметим, что практическое применение имеют в настоящее время лишь два последние способа, а в особенности — дополнительные полюсы. Что же касается уменьшения добавочного тока i_k помощью сопротивлений, включаемых между обмоткой якоря и коллектором, т. е., иначе говоря, устройства в машине петушков повышенного сопротивления, то способ этот сейчас совершенно оставлен. Произошло это потому, что потери в добавочных сопротивлениях уменьшают коэффициент полезного действия машины и, кроме того, сами сопротивления являются весьма слабым местом (легко перегорают при случайной перегрузке их током). Поэтому подробнее рассмотрим лишь создание коммутирующей э. д. с.

б) Создание коммутирующей электродвижущей силы путем смещения щеток. Рассматривая условия коммутирования, мы установили, что добавочный ток i_k будет отсутствовать в течение всего периода коммутации в том случае, когда электродвижущая сила e_s уничтожена полностью э. д. с. внешнего поля.

Наиболее простой способ создания e_c заключается в сдвиге щеток из геометрической нейтральной линии, причем в генераторе сдвиг этот должен быть по направлению вращения, в двигателе же, вследствие обратного направления тока в якоре по сравнению с генератором, при прочих равных условиях, необходим сдвиг щеток против направления вращения.

При рассмотрении явления реакции якоря было показано,

что в случае положения щеток „на нейтрали“ имеем при нагрузке машины смещение действительной нейтральной линии поля по направлению вращения (случай генератора). Секции якоря, замыкаемые накоротко щетками при их переходе из одной параллельной ветви в другую, совершают этот переход, находясь в более или менее сильном магнитном поле. В результате в секции, помимо э. д. с. e_s , препятствующей переходу тока, появляется еще э. д. с. e_c . Эта последняя имеет, в этом случае, направление, совпадающее с e_s .

Последнее легко установить из тех соображений, что э. д. с. самоиндукции имеет всегда знак исчезающего тока, так как она стремится поддержать в секции прежний ток (ток той параллельной ветви, откуда секция вышла) и воспрепятствовать появлению в ней тока той ветви, куда секция вступает. При сдвиге нейтральной линии поля по направлению вращения, в секции в период коммутации будет индуцироваться внешним полем э. д. с. e_c того направления, которое она имела, пока секция находилась в предыдущей параллельной ветви, так как поле сдвинулось по направлению вращения. Так как ток в параллельной ветви генератора идет в направлении индуцированной э. д. с., то очевидно, что e_s и e_c совпадают по направлению.

Для того чтобы создать э. д. с. внешнего поля e_c обратного, по сравнению с э. д. с. e_s знака, нужно, очевидно, переместить щетки настолько, чтобы секция в момент ее коммутации попала во внешнее поле полярности, противоположной той, где она находилась во время своего движения в пределах предыдущей параллельной ветви. Необходимо настолько сдвинуть щетки, чтобы коммутируемая секция находилась за переместившейся при нагрузке нейтралью поля машины.

Однако при сдвиге щеток положение нейтральной линии поля, в свою очередь, изменяется, и при смещении щеток на угол β положение, которое займет нейтральная линия, будет зависеть от того, насколько будет искажено уменьшенным числом поперечных витков поле полюсов, ослабленное появившимися продольными витками. При этом может получиться сдвиг нейтральной линии на $\angle \alpha > \angle \beta$ или же на $\angle \alpha = \angle \beta$ или, наконец, на $\angle \alpha < \angle \beta$ (рис. 112).

Отметим, что, ввиду значительно меньшего числа ампервитков якоря по сравнению с ампервитками полюсов, всегда удастся добиться последнего соотношения путем соответствующего сдвига щеток. В этом случае можно установить в коммутационной зоне, т. е. на той части окружности якоря, где лежат короткозамкнутые проводники, необходимое внешнее поле, так называемое „коммутирующее поле“, и создать нужную для компенсации э. д. с. самоиндукции e_s э. д. с. внешнего поля e_c . Величина коммутирующей э. д. с., в наиболее общем виде, может быть выражена так:

$$e_c = 2B_c w_k v l 10^{-8} \text{ вольт,} \quad (147)$$

где B_c — индукция в коммутационной зоне.

Ввиду того, что при полной компенсации э. д. с. должно иметь место равенство:

$$e_s = e_c,$$

подставим в него значение e_c из ур-ния (147) и e_s из ур-ния (145). Тогда:

$$2B_c w_k v l 10^{-8} = w_k v A S \zeta 10^{-8},$$

откуда:

$$B_c = A S \zeta. \quad (148)$$

Если считаться с неизменным средним значением e_s за все время коммутации, то электродвижущая сила e_s , а следовательно, и индукция B_c должны быть неизменны за все время прохождения проводником коммутационной зоны.

В действительности, однако, индукция внешнего поля в этой зоне при смещении щеток с нейтрали не остается постоянной, а изменяется согласно рис. 131.

При этом, в зависимости от величины тока в якоре машины, т. е. от ее нагрузки, величина поля в зоне коммутации меняется вследствие влияния реакции якоря, уменьшаясь по мере увеличения нагрузки. На рис. 131 пунктирная кривая дает поле при холостом ходе, сплошная — при нагрузке машины. Получается как раз обратное тому, что требует ур-ние (148): индукция в коммутационной зоне падает при увеличении нагрузки, тогда как она должна возрастать. Все это позволяет получить компенсацию э. д. с. лишь при средней нагрузке и притом не в течение всего периода коммутации.

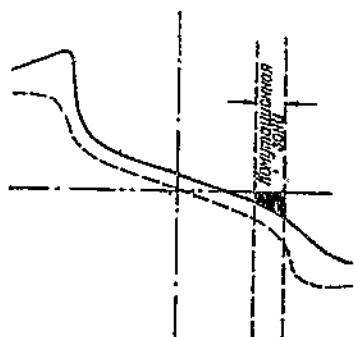


Рис. 131.

Для того чтобы все же, по возможности, приблизить форму кривой внешнего поля в зоне коммутации к прямоугольной ($B_c = \text{const}$), полагая, опять-таки, неизменное значение e_s , равное ее среднему значению, применяют ряд мер, которые, впрочем, дают лишь небольшой эффект. Сюда относятся особые конструкции полюсов и полюсных наконечников. Все эти конструкции имеют целью создать более пологое и устойчивое поле в коммутационной зоне.

Для получения такого пологого поля можно применить полюсные наконечники с перемычками между полюсами (рис. 132), а также скосить или закруглить полюсный наконечник. Насыщением края полюсного наконечника, как и созданием эксцентричного положения наконечника по отношению к якору, можно ослабить действие поперечных витков якоря и сделать коммутирующее поле более устойчивым. То же может быть достигнуто путем устройства прореза в полюсах рис. 133. Однако, как видно из ур-ния (148) для индукции коммутирующего поля

необходимо не только постоянство B_c , но и увеличение ее пропорционально AS , т. е. пропорционально току, отдаваемому машиной. Ввиду этого желательно полностью уничтожить поле якоря в коммутационной зоне и, кроме того, создать поле, изме-

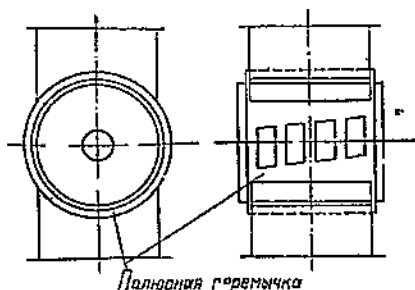


Рис. 132.

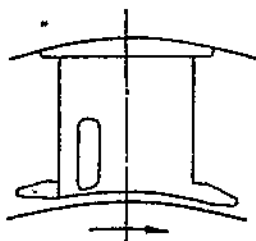


Рис. 133.

нящееся пропорционально току нагрузки. Последнее может быть осуществлено применением особой добавочной обмотки возбуждения a (рис. 134), которая включается последовательно с якорем машины.

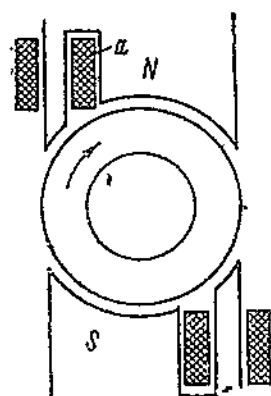


Рис. 134.

Идеальных условий коммутирования такая вспомогательная обмотка все же не дает вследствие вносимого ею искажения поля. Кроме того, наличие вспомогательной обмотки усложняет конструкцию и ухудшает охлаждение полюсов. Условия получаются значительно лучше, если данную вспомогательную обмотку поместить на отдельных полюсных выступах, устроенных между выступами главных полюсов. Таким образом приходим к дополнительным полюсам, как основному средству улучшения коммутации.

с) **Дополнительные полюсы.** Идея применения дополнительных полюсов принадлежит Манжесу (патент 1884 г.). Хотя эти полюсы предложены уже давно, они долгое время не находили себе широкого применения ввиду усложнения, вносимого ими, в конструкцию машины. Лишь в случаях, когда условия коммутирования оказывались очень тяжелыми, шли на изготовление дополнительных полюсов. Часто, при этом, помещали их не во все коммутационные зоны, а лишь в две из них (см. рис. 135).

В настоящее время, однако, почти все машины постоянного тока строятся с дополнительными полюсами. Объясняется это тем, что при наличии дополнительных полюсов можно допускать значительно большую линейную нагрузку якоря AS , что ведет к лучшему использованию активного материала машины и с избытком окупает стоимость изготовления самих полюсов. При этом дополнительные полюсы помещают во все без исклю-

чения коммутационные зоны и лишь в малых четырехполюсных машинах помещают добавочные полюсы только в двух коммутационных зонах.

Назначением дополнительных полюсов является уничтожение поперечного поля якоря в коммутационной зоне и создание соответствующего коммутирующего поля. Так как дополнительные полюсы помещают на геометрической нейтральной линии главного поля машины, то в этом же положении должны стоять и щетки (никакой сдвиг их в этом случае недопустим). Обмотку дополнительных полюсов включают последовательно с якорем.

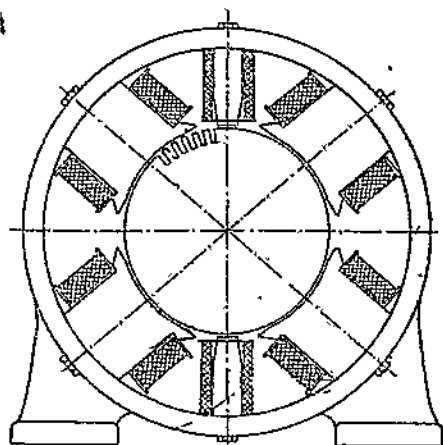


Рис. 135.

Ввиду того что одной из задач дополнительных полюсов является компенсация якорного поля, направление тока в обмотке их должно быть выбрано таким, чтобы ампервитки этих полюсов были направлены навстречу ампервиткам якоря. Следовательно, если представить распределение ампервитков дополнительных полюсов в виде прямо-

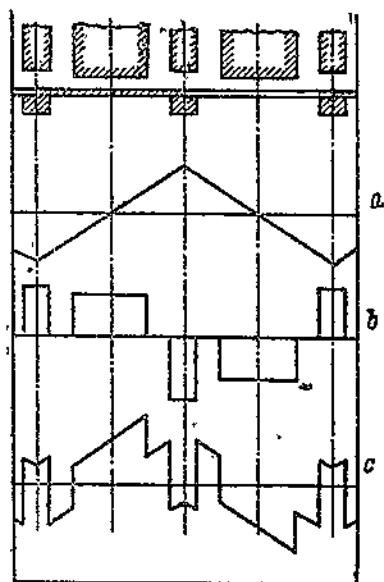


Рис. 136.

угольников (рис. 136, б), то по вычитании из него треугольной кривой ампервитков якоря (рис. 136, а) получится остаток ампервитков, который обусловит поле под дополнительными полюсами

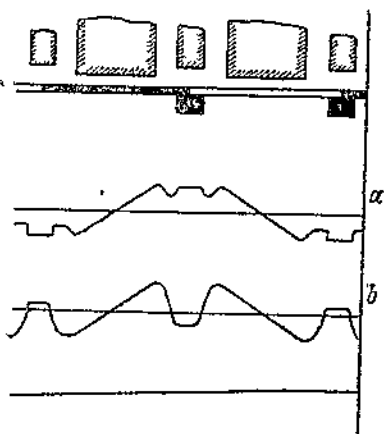


Рис. 137.

(рис. 136, с). Результирующая кривая ампервитков главной магнитной цепи машины также показана на рис. 136, с.

На рис. 137 даны сравнительные кривые поля якоря (рис. 137, а) и поля дополнительных полюсов совместно с полем якоря (рис. 137, б). Как видно из кривых, дополнительные полюсы деформируют кривую поля якоря лишь в зоне коммутации, не оказывая влияния на части этого поля, лежащие вне коммутационной зоны. Ввиду этого искажение основного поля машины происходит полностью и даже в большей степени, чем в машинах без дополнительных полюсов, вследствие больших значений AS .

Исходя из двух основных требований, предъявляемых к дополнительным полюсам, а именно: компенсации якорного поля в коммутационной зоне и создания соответствующей индукции B_c , необходимой для индуктирования электродвижущей силы e_c , направленной навстречу реактивной электродвижущей силе e_s , — можно представить необходимое число ампервитков на пару добавочных полюсов:

$$AW_c = AW_q + AW_k, \quad (149)$$

где

$$AW_q = \tau AS.$$

Что же касается ампервитков коммутирующего поля, то для них можно написать:

$$AW_k = 1,6 B_c \delta'_c.$$

Индукция под добавочным полюсом определится из выражения:

$$B_c = \frac{l}{l_d} AS \zeta, \quad (150)$$

полученного на основании ур-ния (148) с учетом того обстоятельства, что длина добавочного полюса (l_d) может быть меньше длины якоря (l).

Так как

$$\frac{AW_c}{AW_q} = 1,2 - 1,3,$$

то можно выбрать ампервитки дополнительных полюсов, исходя из этих пределов, а затем на готовой машине произвести точную подгонку помощью изменения величины воздушного зазора под добавочным полюсом или путем изменения числа витков его обмотки.

Полярность добавочных полюсов легко установить, исходя из предъявляемых к ним требований. Реакция якоря в генераторе ослабляет магнитный поток под набегающим краем полюса и усиливает под сбегающим. Поэтому направление якорного поля в коммутационной зоне будет противоположно потоку того полюса, который сдвинут по отношению к данной зоне в направлении вращения машины. Следовательно полярность дополнительного полюса в этой зоне должна соответствовать полярности

основного полюса, следующего по направлению вращения от данной коммутационной зоны. Вместе с тем, с точки зрения второго условия (создания соответствующего коммутирующего поля) очевидно, что для ускорения процесса коммутации помощью уничтожения в. д. с. самоиндукции необходимо создать поле той полярности, куда секция перейдет по окончании коммутации. Таким образом полярность дополнительного полюса должна соответствовать главному полюсу, расположенному по направлению вращения якоря.

К особенностям магнитной цепи дополнительных полюсов необходимо отнести требование низких значений индукции в сердечнике дополнительного полюса. Требование это обусловлено необходимостью изменения потока полюса пропорционально току его возбуждения. Электродвижущая сила самоиндукции в короткозамкнутой секции e_s растет пропорционально току нагрузки. Для того чтобы получить компенсацию электродвижущих сил e_s и e_a необходимо, чтобы последняя, а следовательно и индукция под дополнительным полюсом, изменялись пропорционально току, что может иметь место лишь при отсутствии насыщения. Индукция в сердечнике полюса B_{dp} должна быть, поэтому, порядка 10 000—12 000 Г при полной нагрузке машины.

Другой особенностью дополнительных полюсов является значительная величина рассеяния их потока. Коэффициент рассеяния этих полюсов σ_d может достигать значений порядка 3—5. Объясняется это тем, что дополнительный полюс должен компенсировать весьма большое поле якоря в коммутационной зоне. При таких условиях полезное поле дополнительного полюса, определяемое ампервитками AW_k , относительно мало; поток же рассеяния, определяемый всеми ампервитками дополнительного полюса, весьма велик и значительно превосходит полезный поток. Ввиду этого при точном расчете и конструкции дополнительных полюсов следует помещать медь обмотки возбуждения возможно ближе к якорю. Введение второго воздушного зазора (между сердечником дополнительного полюса и ярмом) также способствует уменьшению коэффициента рассеяния σ_d .

Что же касается размеров дополнительного полюса, то сердечник полюса выбирается, исходя из указанных значений индукции B_{dp} . Полюсный наконечник делают равным ширине коммутационной зоны машины.

Так как под коммутационной зоной мы понимаем дугу якоря, на которой лежат короткозамкнутые проводники, то необходимо найти эту дугу.

Ввиду того, что секция находится в коротком замыкании во все время соединения коллекторной пластины, к коей приключена одна из активных сторон, с другой пластиной через щетку (или для последовательной обмотки через щетки одинаковой полярности), то имеем дугу якоря, проходимую активной стороной за время короткого замыкания:

$$\alpha_1 = b_B \frac{D}{D_k}.$$

При $\frac{s_n}{2}$ рядах секций в одной впадине короткое замыкание крайней секции, сдвинутой против направления вращения, наступит лишь после того, когда коллектор сдвинется от начала перекрытия первой секции на дугу:

$$t_k \left(\frac{s_n}{2} - 1 \right),$$

где t_k — коллекторное деление, т. е. ширина пластины и изоляции между двумя пластинами.

Сдвиг на эту дугу на коллекторе вызовет сдвиг по окружности якоря:

$$\alpha_2 = t_k \left(\frac{s_n}{2} - 1 \right) \frac{D}{D_k} = t_1 - t_k \frac{D}{D_k},$$

так как очевидно, что дуга якоря, приходящаяся на один паз, есть не что иное, как зубцовое деление t_1 .

Сумма:

$$b_B \frac{D}{D_k} + t_1 - t_k \frac{D}{D_k}$$

дает, очевидно, необходимую ширину коммутационной зоны.

В последнее выражение приходится, однако, ввести еще две небольшие поправки. В случае последовательной обмотки секция замыкается накоротко различными одноименными щетками, сдвинутыми на $\frac{K}{p}$ коллекторных пластин. Сами же пластины, к коим присоединена секция, сдвинуты на

$$y_k = \frac{K - a}{p}$$

пластин.

Ввиду этого время пребывания секции в коротком замыкании сокращается, так как одна из пластин начинает соприкасаться со щеткой позже, чем другая, вследствие того, что

$$y_k \neq \frac{K}{p}.$$

Сдвиг на окружности якоря, который секция получит после момента соприкосновения одной из ее сторон со щеткой до момента соприкосновения со щеткой другой ее стороны, будет:

$$t_k \left(\frac{K}{p} - y_k \right) \frac{D}{D_k} = t_k \frac{a}{p} \frac{D}{D_k}.$$

Так как, с другой стороны, секции последовательной обмотки находятся в коротком замыкании во все время соприкосновения пластин со щеткой, то время коммутации, по сравнению с таким же параллельной обмотки, надо увеличить на

$$t_k \frac{D}{D_k}.$$

Имеем, поэтому, дополнительную дугу коммутационной зоны:

$$\alpha_3 = t_k \left(1 - \frac{a}{p}\right) \frac{D}{D_k}.$$

Вторым обстоятельством, ведущим к некоторому расширению коммутационной зоны, является возможное сокращение (удлинение) шага обмотки. В этом случае нижние секции паза вступают в коммутацию не одновременно с верхними, а позже. Необходимо предусмотреть поэтому еще и ту дугу, на которую якорь успеет сдвинуться до конца коммутации нижней стороны секции, вступившей последней в короткое замыкание. Этот сдвиг должен быть равен имеющемуся сокращению шага обмотки. Дуга якоря, соответствующая данному сокращению шага, может быть выражена так:

$$\alpha_4 = t_k \left(\frac{K}{2p} - y_1\right) \frac{D}{D_k}.$$

Ширина коммутационной зоны, равная ширине полюсного наконечника добавочного полюса:

$$b_c = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4$$

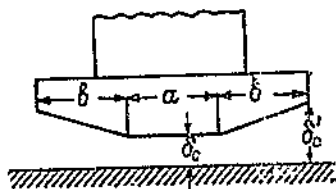


Рис. 138.

или, подставляя значения отдельных составляющих, получим для всех обмоток:

$$b_c = t_1 + b_B \frac{D}{D_k} + t_k \frac{D}{D_k} \left[\left(\frac{K}{2p} - y_1\right) - \frac{a}{p} \right].$$

Для междужелезного пространства под дополнительным полюсом берут $\delta_c = \delta$ или немного более. Форма полюсного наконечника может быть выбрана в соответствии с рис. 138 (принимая $a = b$, $\delta'_c = 2\delta$) или, более точно, — на основании результирующей кривой реактивной электродвижущей силы короткозамкнутой секции впадины (см. рис. 130).

7. Искрение на коллекторе, круговой огонь и компенсационная обмотка.

Значение безискрового снятия тока было подчеркнуто нами во введении к данному отделу, причем было указано также на возможность перехода искрения под щетками в так называемый круговой огонь. Рассмотрим теперь это явление несколько глубже.

Причиной появления кругового огня является искрение на коллекторе. Это искрение может возникнуть как вследствие неблагоприятных условий коммутации тока, так и вследствие механических, а также потенциальных причин. Очаг для возникновения искрения лежит обычно под щетками.

Оставляя в стороне подробный анализ механических причин искрения, укажем только на необходимость солидной конструк-

ции всего аппарата, служащего для снятия тока с коллектора, как-то щеткодержателей и щеточной траверсы, а также на необходимость правильной сборки и солидной конструкции коллектора. Кроме того, следует отметить ту тесную связь, какая существует между искрением, вызванным механическими причинами, и искрением коммутационного порядка, поскольку вибрация щеток и изменение контакта их с коллектором нарушают в значительной степени процесс перехода тока.

Коммутационное искрение было нами рассмотрено подробно.

Искрение потенциального характера имеет в своей основе следующие причины.

Поперечные ампервитки якоря, кроме некоторого размагничивающего действия, создают значительное искажение кривой распределения магнитного поля. Это искажение поля, не сказываясь непосредственно на уменьшении э. д. с. машины, имеет, однако, своим следствием значительное повышение значений индукции в некоторых местах междужелезного пространства, что повышает э. д. с. в стержнях обмотки, попадающих при вращении якоря в это место магнитного поля. Ввиду высокого потенциала, приобретенного этими стержнями, повышается также разность потенциалов между соединенными с этими стержнями пластинами коллектора и соседними с ними. Если эта разность потенциалов достигнет величины, превосходящей 30—50 В (соответственно меньший предел для больших машин), то может получиться перекрытие вольтовой дугой изоляции между соседними пластинами, соединенными с теми секциями якоря, стороны которых находятся в наиболее сильном поле.

Повод к такому перекрытию может дать также угольная и металлическая пыль, имеющаяся на коллекторе — частицы материала щеток и самого коллектора, стертые с поверхности при вращении якоря. Получается проводящий слой, замыкающий пластины между собой поверх изоляции.

При достаточном напряжении между коллекторными пластинами возникает дуга, которая ионизирует окружающее пространство и дает повод к образованию следующих более мощных дуг, быстро развивающихся в сплошной круговой огонь.

Очевидно, что путем соответствующего расчета машины можно добиться того, чтобы разность потенциалов между пластинами коллектора была меньше указанных предельных значений.

Переходя к количественному определению разности потенциалов между соседними коллекторными пластинами, необходимо, прежде всего, вычислить среднее значение э. д. с., индуцированной в одной секции обмотки якоря.

Электродвижущую силу E_a , индуцированную в одной параллельной ветви обмотки, можно принять (пренебрегая падением напряжения):

$$E_a = U,$$

где U — напряжение на зажимах машины. В этом случае сред-

нее значение а. д. с. одной секции получит значение:

$$E_{s_{\text{med}}} = \frac{U}{K} = \frac{2aU}{K}, \quad (151)$$

ибо в каждой параллельной ветви находится $\frac{K}{2a}$ секций.

Переходя к выражению разности потенциалов между смежными пластинами коллектора E_k при различных типах обмоток якоря, необходимо отметить следующее.

В простой параллельной обмотке между соседними пластинами лежит только одна секция, причем $a = p$.

Отсюда:

$$E_{k_{\text{med}}} = E_{s_{\text{med}}} = \frac{2pU}{K}.$$

В случае простой последовательной обмотки между соседними пластинами имеем p секций и $a = 1$. Следовательно,

$$E_{k_{\text{med}}} = p E_{s_{\text{med}}} = p \frac{2aU}{K} = \frac{2pU}{K}.$$

Для множественно-параллельной обмотки $a = mp$, причем каждая секция обмотки присоединена к пластинам, находящимся на расстоянии m коллекторных пластин. При наличии эквипотенциальных соединений, что всегда имеет место, напряжение равномерно распределяется на все m пластин, ввиду чего между пластинами получается $1/m$ часть напряжения:

$$E_{k_{\text{med}}} = \frac{1}{m} E_{s_{\text{med}}} = \frac{1}{m} \frac{2mpU}{K} = \frac{2pU}{K}.$$

Для множественно-последовательной обмотки получится:

$$E_{k_{\text{med}}} = \frac{p}{a} E_{s_{\text{med}}} = \frac{p}{a} \frac{2aU}{K} = \frac{2pU}{K},$$

так как между исходной пластиной и отстоящей от нее на a пластин имеем p секций, но напряжение $p E_{s_{\text{med}}}$ равномерно делится (эквипотенциальные соединения) на все a пластин.

Из сравнения всех формул оказывается, что они одинаковы для всех типов обмоток

$$E_{k_{\text{med}}} = \frac{2pU}{K}. \quad (152)$$

Практически наибольший интерес представляет, однако, не средняя величина напряжения между коллекторными пластинами, а наибольшая, которая получается, когда секция, соединенная с пластинами, находится в наиболее сильном поле.

Рассматривая кривую поля при расчете ампервитков между железного пространства, мы установили следующее отношение между максимальной и средней ординатами кривой:

$$\alpha_1 = \frac{b}{c} = \frac{B_{\text{med}}}{B_a}.$$

Так как э. д. с. каждой секции при шаге ее, близком к диаметральному, воспроизводит изменения индукции поля, можно считать, что при холостом ходе:

$$\frac{E_{s_{med}}}{E_{s_{max}}} = \frac{B_{med}}{B_3} = \alpha_1.$$

Отсюда следует, что для получения по среднему значению разности потенциалов его максимального значения необходимо написать:

$$E_{k_{max}} = \frac{E_{k_{med}}}{\alpha} = \frac{2pU}{\alpha_1 K}, \quad (153)$$

причем, конечно, данное выражение справедливо лишь при холостом ходе машины.

Как показали опыты американского инженера Ламме (Lamme), эта величина, во избежание возникновения кругового огня на коллекторе, не должна превосходить 28 V в машинах на большую силу тока, 30—33 V—в средних машинах и 50—60 V—в малых машинах.

Из сказанного видно, что искрение потенциального порядка, как будто, совершенно не связано с коммутационным искрением. Стоит только, казалось бы, предусмотреть при расчете машины $E_{k_{max}}$ меньше указанных выше допустимых значений, чтобы быть гарантированными от кругового огня. Как показывает, однако, опыт эксплуатации крупных электрических машин, дело обстоит далеко не так просто. Имеется теснейшая связь между искрением потенциального порядка и искрением коммутационным. Машина, благополучная по допущенному в ней значению $E_{k_{max}}$, может дать круговой огонь в случае резкого нарушения коммутации тока. Коммутационное искрение может развиваться и перейти в круговой огонь.

Особенно тяжело складываются условия в случае реакных толчков нагрузки и короткого замыкания машины, как предельного возможного толчка тока. Дополнительные полюсы могут оказывать при этом даже вредное влияние на коммутацию машины, так как при токах, значительно превышающих номинальный, получается насыщение сердечников этих полюсов и лишь весьма небольшое возрастание потока, индуктирующего электродвижущую силу e_c . В то же время наконечник и сердечник полюса, будучи выполнены из железа, увеличивают проводимость для поля якоря в зоне коммутации, по сравнению с таковой же машины без добавочных полюсов, чем способствуют усилению вредного влияния этого поля. Быстрому нарастанию потока дополнительных полюсов препятствуют также токи Фуко, появляющиеся в сплошной массе дополнительного полюса при быстром изменении тока.

Баланс электродвижущих сил в коммутируемом контуре резко нарушается, появляется некомпенсированная разность

з. д. с., причем коммутация замедляется, так как превалирует реактивная э. д. с. e_s .

На коллекторе возникает искрение, имеющее своим очагом сбегаящий край щеток, раскаленный благодаря повышенной плотности тока (места раскаливания — см. рис. 139, а). Между щеткой и покидающей ее пластиной возникает вольтова дуга (рис. 139, б), которая растягивается механически благодаря движению коллектора (рис. 139, с). Через дугу проходит при этом значительный ток, складывающийся из тока короткого замыкания секций, перекрытых дополнительно дугой, а также из тока, отдаваемого этим секциям во внешний контур через дугу.

Благодаря значительному току в дуге появляются электродинамические усилия, стремящиеся ее растянуть, благодаря чему вольтова дуга приобретает форму рис. 139, д, что, в свою очередь, ведет к весьма быстрому перемещению катодного пятна увлекаемого разрастающейся дугой. Скорость перемещения пятна может быть при этом значительно большей, чем скорость на окружности коллектора. Ввиду значительной длины растянувшейся дуги падение напряжения в ней возрастает, что обуславливает нарастание потенциала щетки по отношению к коллектору. Возникает вторая дуга между щеткой и коллектором (рис. 139, е), шунтирующая первую. Разность потенциалов, обуславливающая существование первой дуги, падает; растянувшаяся дуга обрывается. Начинает растягиваться новая дуга (рис. 139, ф); эта последняя растянется, однако, на большее расстояние, так как окружающее коллектор пространство ионизировано предыдущей дугой, а процесс рекомбинации ионов может не закончиться к моменту прохождения последующей дугой пространства, занятого ранее предыдущей (рис. 139, г). Процесс обрыва и восстановления дуги продолжается много раз, причем в случае глухого короткого замыкания, сопровождаемого большим током, и недостаточной скорости отключения машины дуга растягивается через некоторый промежуток времени настолько, что доходит до щеток противоположной полярности, последнее ведет к короткому замыканию непосредственно на коллекторе

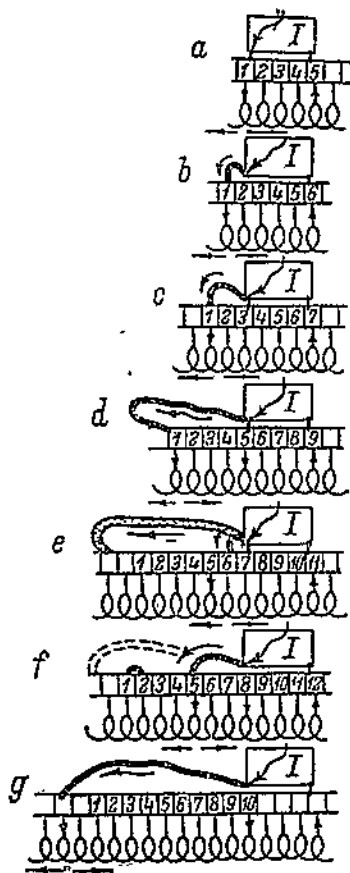


Рис. 139.

генератора. Дуга продолжает гореть, разрушая коллектор и щетки, до момента снятия с машины возбуждения и гашения ее поля.

Описанная картина возникновения кругового огня была установлена проф. О. Б. Броном (ХЭМЗ) на основании чрезвычайно остроумно поставленных им опытов на генераторах Сурамского перевала.¹⁾ Брон показал, что скорость распространения кругового огня на коллекторе не есть фиксированная величина, как думали другие авторы, из коих одни считали, что эта скорость равна скорости на окружности коллектора, а другие полагали ее равной половине скорости коллектора. Вольтовые дуги при коротком замыкании машины, как это было уже изложено, возникали периодически, причем каждая из этих дуг двигалась со скоростью, значительно (до 10 раз) превышающей скорость на окружности коллектора. Среднюю скорость распространения кругового огня Брон определил как частное от деления наибольшей длины дуги s_m на время t_m , протекшее от момента возникновения огня до момента достижения им наибольшей длины:

$$V_m = \frac{s_m}{t_m}.$$

Эта скорость менялась в зависимости от напряжения перед моментом короткого замыкания, в пределах от 6,8 м/сек до 23 м/сек, тогда как окружная скорость на коллекторе была 24,9 м/сек.

Весьма интересны кривые, полученные проф. Броном (рис. 140), иллюстрирующие высказанные выше положения.

Левая диаграмма (рис. 140, а) дает зависимость пути, пройденного дугой на коллекторе, в функции времени. Диаграмма построена на основании фотографии кругового огня, полученной помощью фотоаппарата, снабженного объективом, смещающимся вверх. Смещение это происходит в течение времени немного большего, чем время всего явления возникновения и исчезновения затем огня на коллекторе вслед за выключением машины.

На рис. 140, а выделены отдельные вероятные дуги, насколько это представилось возможным сделать на основании фото. Рис. 140, б дает кривые, иллюстрирующие: 1—зависимость пути, пройденного огнем по коллектору, от времени, 2—зависимость скорости движения огня по коллектору от времени, 3—зависимость тока в главной цепи машины от времени.

Вопрос установления физики процесса образования кругового огня является весьма существенным, так как он позволяет надежно оценить те методы, которые применяют в настоящее время с целью борьбы с возникновением кругового огня.

Наиболее действительным методом борьбы являются быстро действующие выключатели, размыкающие цепь машины в течение весьма короткого промежутка времени, порядка 0,06—0,01 сек. На рис. 141 приведена схема такого выключателя.²⁾ Здесь:

¹⁾ Электричество, 1935, № 3, стр. 3—12.

²⁾ Подробнее, см. Электричество — 1934, № 14, стр. 28—36.

контакт выключателя 1, связанный механически с якорем 2 подковообразного электромагнита 3, снабженного катушкой воз-

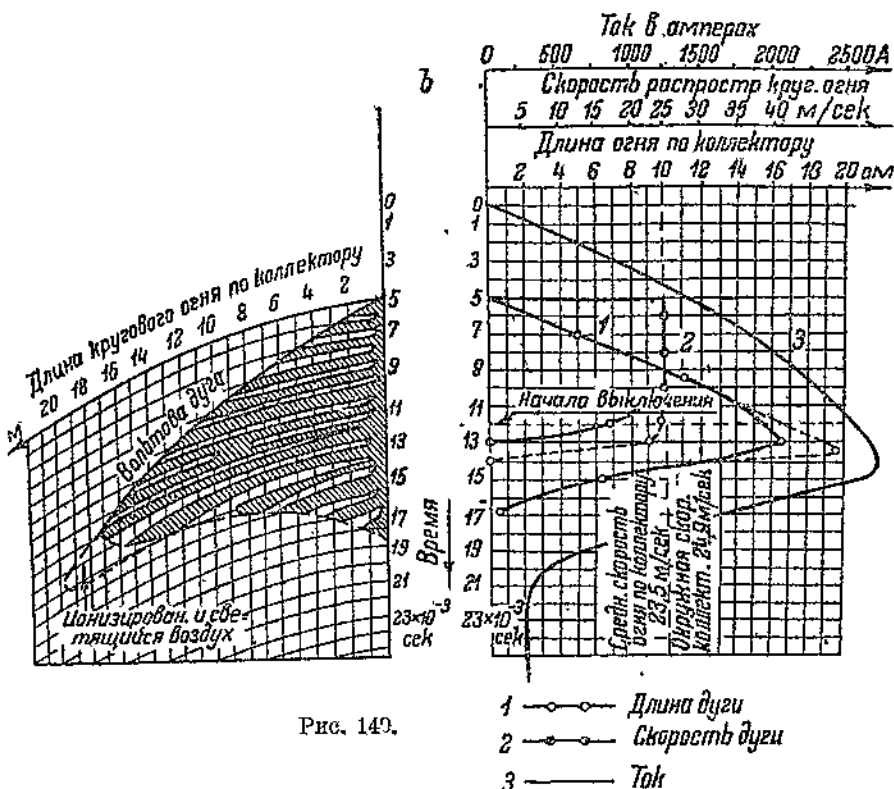


Рис. 140.

буждения 4. При включении тока в катушку 4 якорь притягивается и электромагнит замыкает цепь. Ток защищаемой автоматом машины проходит через виток 5, расположенный на сердечнике 6. Направление потока, создаваемого этим током, таково, что он ослабляет поле, созданное ампервитками катушки 4.

Когда ток в главной цепи машины достигнет опасной величины, то встречные ампервитки возрастут настолько, что дают пружине 7 возможность оторвать якорь 2, а с ним и выключающий контакт 1. Возникающая при отключении между контактами 1—1 дуга гасится воздушным дутьем, подаваемым помощью специального сопла в промежуток между расходящи-

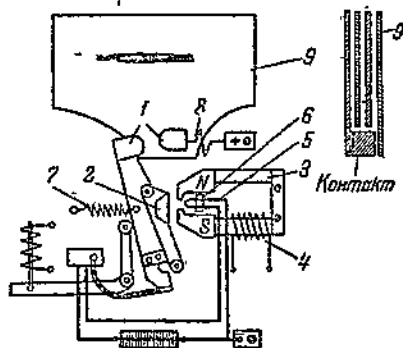


Рис. 141.

мися контактами. Быстрому гашению дуги способствует искрогасительная камера 9, состоящая из ряда цемент-асбестовых пластин, между которыми идет быстрая деионизация дуги вследствие поглощения тепла пластинами и снижения поэтому температуры дуги. Быстрому гашению дуги помогает также система искрогасительных катушек 8. Быстрота размыкания контактов выключателя должна быть, во всяком случае, такова, чтобы вольтова дуга не успела перекинуться на соседний щеткодержатель. Поскольку средняя скорость распространения дуги близка к скорости на окружности коллектора, необходимо чтобы время размыкания было меньше времени, нужного для того, чтобы пластина успела пройти путь между двумя соседними щеткодержателями.

Поскольку, однако, нет все же никакой гарантии, что скорость распространения огня на коллекторе при всех возможных условиях его возникновения не превзойдет скорости на окружности коллектора, то желательно задерживать распространение дуги и сопровождающих ее ионизированных газов. Перегородки, имеющие достаточную высоту и расположенные поперек коллектора, значительно способствуют такой задержке. Эти перегородки, отнимая в то же время от дуги тепло, деионизируют ее. Кроме того, необходимо ставить изоляционные щиты, которые препятствовали бы дуге переместиться на торец коллектора.

Сказанное относится ко всем тем случаям, где вероятно возникновение кругового огня, причем, в особенности, к высоковольтным машинам, напряжение которых выше 1000 V.

Средством, значительно уменьшающим возможность возникновения кругового огня, является также компенсационная обмотка, укладываемая во впадины, проделанные в полюсных наконечниках. Обмотка эта должна быть так выполнена, чтобы в схеме развертки якорной и компенсационной обмоток одна явилась зеркальным изображением другой. Ввиду наличия промежутков между полюсными наконечниками и дополнительных полюсов, располагаемых в этих промежутках, полностью осуществить в нормальных конструкциях идентичность обмоток якоря и компенсационной практически не удастся, но все же значительная часть поперечного поля уничтожается встречными ампервитками включенной последовательно с якорем компенсационной обмотки. На рис. 36, а и б была показана станина машины постоянного тока с такой обмоткой.

Особое значение имеет компенсационная обмотка в турбогенераторах постоянного тока, прокатных двигателях и высоковольтных генераторах. В этих типах машин разность потенциалов между соседними пластинами коллектора находится уже на пределе. В турбогенераторах, вследствие необходимости уменьшить диаметр якоря и коллектора, приходится делать относительно малое число пластин, что ведет к увеличению разности потенциалов между ними. Применяя компенсационную обмотку, можно не бояться, что при нагрузке разность потенциалов, вслед-

ствие искажения кривой поля превзойдет допустимую величину. В прокатных двигателях имеют место значительные кратковременные перегрузки (до 3—4-кратных номинальных значений тока), что при отсутствии компенсации поля якоря легко может облегчить возникновение кругового огня. Наконец, высоковольтные машины имеют уже при холостом ходе высокие значения разности потенциалов между пластинами вследствие общей значительной величины напряжения. Поэтому повышать эту разность при нагрузке недопустимо.

8. Щетки, применяемые в динамостроении.

Щетки, налагаемые на коллектор машины для отвода тока во внешнюю цепь, представляют собой весьма существенное звено в числе других частей машины постоянного тока. Особое значение приобретают щетки ввиду значительного влияния свойств их на течение процесса коммутирования тока. Рассматривая секцию, замкнутую накоротко щеткой (рис. 142), видим, что в случае появления в короткозамкнутом контуре э.д.с., добавочный ток, созданный этой э.д.с., будет замыкаться через щетки и контактную поверхность соприкосновения щетки с пластинами коллектора. От свойств щетки и переходного слоя между щеткой и коллектором зависит, в значительной мере, величина сопротивления току короткого замыкания, а следовательно, и величина этого тока, которая должна быть, по возможности, ограничена во избежание искрения на коллекторе.

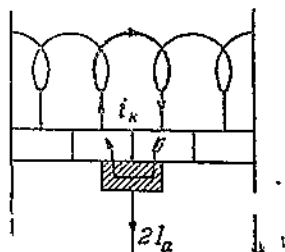


Рис. 142.

Применявшиеся первоначально медные щетки применяются в настоящее время лишь для низковольтных машин, ввиду малого сопротивления контакта их с коллектором. По почину Тюри (Thury), с девяностых годов прошлого столетия получили распространение угольные щетки. В последнее время применяются угольно-графитовые щетки, хорошо пришлифовывающиеся к коллектору, металло-угольные щетки, а также щетки с бакелитовыми прослойками. Металло-угольные щетки изготавливаются таким образом, что проводимость щетки в осевом направлении (направлении отдаваемого в сеть тока) получается наибольшей, тогда как проводимость в поперечном направлении 5—12 раз меньше. Что касается графитовых щеток, то различают электрографитовые и твердографитовые щетки. Первые получают путем прокаливания угля электрическим током. Все эти сорта щеток применяются в определенных областях. Угольно-графитовые щетки применяются, обычно, при малых и средних скоростях коллекторов. При этом плотность тока в них допускается до 8 A/cm^2 . Этот сорт щеток наиболее дешев, вследствие чего и применяется везде, где это только возможно. Если по условиям необходимой плотности тока, а также из-за высокой окружающей

скорости, угольно-графитовые щетки применить нельзя, применяют графитовые или электрографитовые щетки. Особенно хороши последние, так как очень прочны, дают весьма малый износ коллектора и в то же время обладают большим переходным сопротивлением. Область применения медно-угольных и медно-графитовых щеток ограничивается машинами низкого напряжения, служащими, например, для электролитических целей.

Угольные и графитовые щетки обладают значительным сопротивлением в переходном слое. Величина этого сопротивления не остается постоянной, а зависит от целого ряда факторов и, прежде всего, от силы тока. Ввиду этого различные сорта этих щеток характеризуются не удельным сопротивлением переходного слоя R_u (сопротивление между 1 cm^2 площади щетки и

коллектором), а падением напряжения в этом слое, причем:

$$e_R = j_B R_u, \quad (154)$$

где j_B — плотность тока под щеткой. Величина e_R мало изменяется при изменении плотности тока в нормальных пределах (см. кривые рис. 143, данные для щеток различной твердости), так что

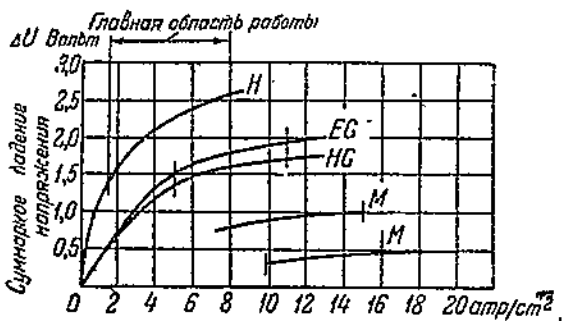


Рис. 143.

можно считать $j_B R_u = \text{const}$. Отсюда очевидно, что R_u при изменении j_B меняется по кривой, близкой к равнобокой гиперболе.

На рис. 143 даны кривые зависимости падения напряжения в контакте двух щеток (положительной и отрицательной) для следующих сортов щеток: H — твердоугольных, EG — электрографитных, HG — высокографитных, M — металлоугольных.

На величину R_u , кроме плотности тока, влияет еще ряд факторов, из которых главнейшие: состояние контактных поверхностей, температура, нажимное усилие и материал щеток.

Химическое состояние поверхностей контакта естественно должно влиять на степень их электропроводности. Так, окисление поверхности коллектора, получающееся вследствие электрохимических процессов в переходном слое при присутствии влаги в окружающем воздухе, ухудшает проводимость, увеличивая R_u , а следовательно, и e_R при том же токе. Влияние температуры сказывается в уменьшении сопротивления R_u с возрастанием силы тока. Объясняется это отрицательным температурным коэффициентом угля, а также тем, что разогретые током частицы угля, оторвавшиеся от щетки и приставшие к коллектору, проходя под щеткой, сплюсываются и способствуют лучшему прилеганию щетки к коллектору, что обуславливает уменьшение R_u . С увеличением нажимного давления e_R и R_u уменьшаются (см. кривые рис. 144). Объясняется это улучшением контакта

между щеткой и коллектором. Соприкосновение контактных поверхностей вследствие зернистого строения щетки идет лишь в относительно малом числе точек; при возрастании же давления число точек соприкосновения увеличивается. Тем не менее чрезмерное увеличение давления невыгодно, так как при этом возрастают потери от трения щеток о коллектор. Материал щеток влияет в том отношении, что чем жестче уголь, тем больше получается e_R при прочих равных условиях. Графитовые щетки имеют те же свойства, что и угольные, но коэффициент трения их о коллектор меньше, вследствие чего уменьшаются потери на трение щеток о коллектор и увеличивается коэффициент полезного действия машин. В таблице 5 приведены основные данные, характеризующие щетки согласно прейскуранту № 12 НКТП.

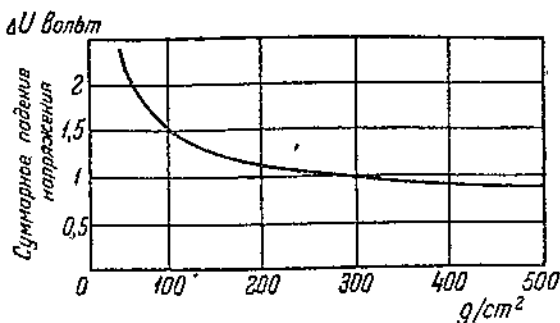


Рис. 144.

Необходимо отметить, что в этой таблице контактные падения напряжения означают:

низкое	до 0,6 В
среднее	0,6 ÷ 1,2 В
высокое	1,2 ÷ 1,7 В
очень высокое	1,7 и более.

Эти цифры дают контактное падение напряжения под двумя щетками (+ и —) при нормальной для данной щетки плотности тока.

Коэффициенты трения имеют значения:

низкий	меньше 0,25,
средний	0,25—0,40,
высокий	более 0,40.

Что же касается выбора того или иного сорта щеток, то с точки зрения хорошей коммутации выгодно брать наиболее твердые щетки, как обладающие наибольшим падением напряжения в переходном слое. Однако щетки эти имеют относительно малую допустимую плотность тока, вследствие чего контактная поверхность их должна быть велика, что увеличивает поверхность коллектора и потери на трение. Ввиду этого следует рекомендовать применять твердые щетки лишь в высоковольтных машинах, где условия коммутации тока наиболее неблагоприятны. В низковольтных же машинах, при хорошей коммутации, лучше брать щетки мягкие и средней твердости.

ТАБЛИЦА 5.

Сорт щеток	Марка завода "Электротуголь"	Твердость по Шору	Удельное электрическое сопротивление $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$	Контактно падение напряжения	Допустимая плотность тока A/cm^2	Коэффициент трения	Допустимая линейная скорость m/sec	Рекомендуемое накатное давление g/cm^2
Угльно-графитные	Т-1	50—70	40—60	очень высокое	4,5	высокий	10	240—320
	Т-2	40—55	40—60	высокое	5	"	12	240—320
Графитные	Г-1	30—50	30—45	"	6	"	15	200—240
Графитные	Г-2	30—45	24—35	"	8	средний	20	180—240
Графитные	Г-3	25—37	10—22	"	10	"	25	120—200
Графитные	Г-4	10—18	10—20	среднее	12	низкий	30	120—160
Графитно-медные	М-1	30—42	4—10	"	14	средний	15	160—200
Графитно-медные	М-3	28—38	6—16	"	12	"	20	160—300
Медно-графитные	МГ	6—12	0,05—0,1	низкое	25—30	"	20	120—150
Медно-графитные	МГ-1	5—7	0,1—0,25	"	22—25	низкий	20	120—150
Медно-графитные	МГ-2	4—6	0,2—0,4	"	22—25	"	25	120—150
Медно-графитные	МГ-3	3—5	0,3—0,45	"	20—22	"	25	120—150

9. Кривые подпитки добавочных полюсов и настройка коммутации машины.

Физическая картина коммутирования тока, изложенная нами в предыдущих параграфах, обследована и обоснована достаточно надежно. Однако расчетные формулы, лежащие в основе количественного анализа коммутации, не отличаются достаточной точностью. Причина этому — весьма большое число различных факторов, влияющих на коммутирование тока. Сюда относятся: переменное сопротивление контакта щетки, состояние поверхности коллектора, температура коллектора и щеток, неравномерное распределение поля дополнительных полюсов и, частично, поля главных полюсов в коммутационной зоне, изменение коэффициента рассеяния дополнительных полюсов с изменением нагрузки машины, насыщение дополнительных полюсов.

В результате точность коммутационных расчетов получается невысокой. Обычно приходится настраивать коммутацию каждой машины нового, типа после ее изготовления. В некоторых случаях удается это сделать достаточно просто и быстро, в других же приходится идти на неко-

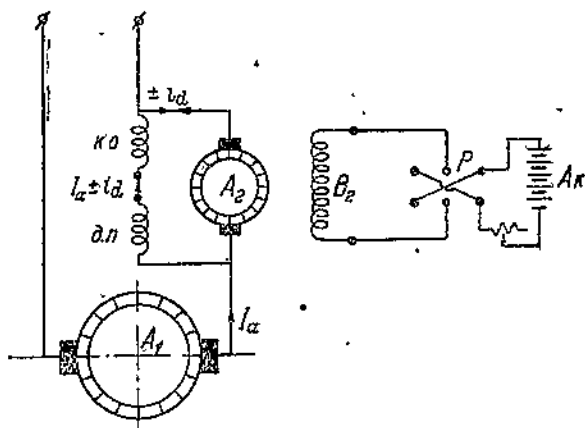


Рис. 145.

торую переделку машины. В результате значительной практики, которая имеется у динамостроительных заводов, удалось выработать такую методику наладки коммутации, которая позволяет не только быстро ответить на вопрос о том, что надо изменить в машине для получения хорошей коммутации, но и прояснить более глубоко в суть самого процесса коммутирования и влияния на него различных факторов. Естественно, поэтому привести в виде заключительной главы данного раздела тот анализ настройки коммутации, который был дан В. Т. Касьяновым в его статье: „Регулировка дополнительных полюсов машин постоянного тока“ ¹⁾.

Основным методом анализа является кривая безискровой зоны. Машина, коммутация тока которой подлежит обследованию, включается по схеме рис. 145, причем исследование может вестись как при нормальном напряжении и замыкании обмотки якоря на нагрузочное сопротивление, так и при коротком замы-

¹⁾ Электричество, 1934, № 20, стр. 1—8.
1935, № 1, „ 45—49.

кании якоря и установлении пониженных токов независимого возбуждения. Опыт показывает, что в большинстве случаев поведение машины в коммутационном отношении при коротком замыкании и при нормальном напряжении оказывается одинаковым.

Обмотка дополнительных полюсов (д. п.), а также компенсационная обмотка (к. о.), если таковая имеется, подпитываются на схеме рис. 145 от отдельного источника тока, например небольшого низковольтного генератора (A_2). Ток этого генератора

должен быть порядка $6-8\%$ от тока, испытываемого при обследовании коммутации большой машины, и порядка $10-25\%$ при обследовании малой машины. Возбуждение подпитывающей машины (B_2) должно быть независимым (например от батареи A_2), реверсивным (помощью переключателя P), для того чтобы можно было задать оба направления тока подпитки добавочных полюсов, т. е. увеличивать или уменьшать по желанию возбуждение дополнительных полюсов при одном и том же токе в якоре испытываемого генератора.

Задавая различные токи в якоре генератора, можно, путем регулировки возбуждения вспомогательной машины, установить такой ток в обмотке дополнительных полюсов, чтобы подойти к границе искрения.

В результате внимательного наблюдения за коллектором

представляется возможным весьма точно установить эту границу и построить кривые, ограничивающие безискровую зону (рис. 146).

Подпитка обмотки дополнительных полюсов ведет, очевидно, к изменению величины коммутирующего поля, ввиду чего в короткозамкнутых щетками секциях появляется добавочный ток i_k , вызывающий искрение, как только величина его становится столь значительной, что он не может быть разорван без искры.

Отрезки Oa и Oc , получающиеся при холостом ходе генератора, пропорциональны той э. д. с. e_c , которая индуктируется полем дополнительного полюса в короткозамкнутом контуре. При нагрузке имеем ординаты кривых подпитки, соответствую-

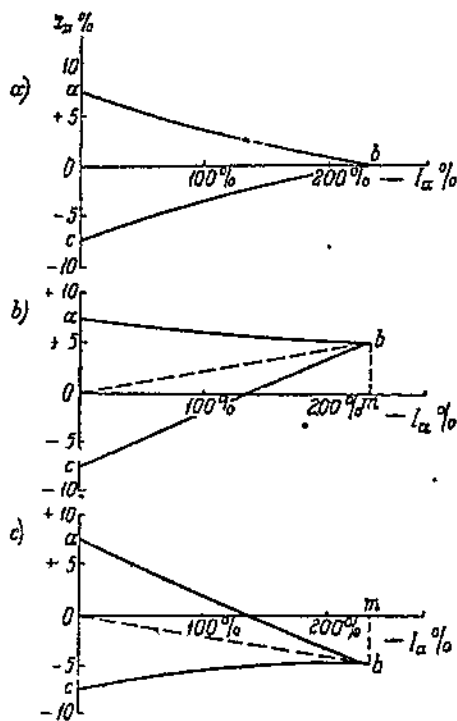


Рис. 146.

щие той разностной э. д. с. между e_c и e_s , которая идет на покрытие падения напряжения в секции и контакте щетки. При совпадении тока подпитки по направлению с основным током обмотки дополнительных полюсов получается избыток $e_c - e_s$, ускоряющий коммутацию (верхняя ветвь кривой подпитки, рис. 146). При направлении тока подпитки противоположном главному току имеем, очевидно, избыток реактивной э. д. с. $e_s - e_c$ и искрение вследствие замедления коммутации.

При рассмотрении кривых рис. 146 обращает, прежде всего, на себя внимание то обстоятельство, что верхняя и нижняя ветви кривой сходятся в некоторой точке, которая определяет предел коммутирующей способности машины.

Если бы коммутирующая э. д. с. компенсировала э. д. с. самоиндукции в любой момент коммутации и при этом обе эти э. д. с. росли пропорционально току, то одной и той же небалансной э. д. с. было бы достаточно при всех нагрузках машины для того, чтобы вызвать искрение щеток; ветви кривой подпитки были бы параллельны оси абсцисс.

Поскольку такой компенсации не происходит и коммутирующая и реактивная э. д. с. имеют различную форму, меняющуюся, кроме того, по мере изменения нагрузки, то условия коммутирования ухудшаются по мере роста нагрузочного тока. Чем больше этот ток, тем меньшее изменение поля дополнительных полюсов ведет к возникновению искрения.

Кривые подпитки могут иметь три характерные вида согласно рис. 146, а, б, в.

В первом случае дополнительные полюсы рассчитаны правильно, ибо ось абсцисс — зона наиболее удаленная от границы искрения — лежит на равном и наибольшем расстоянии от обеих границ искрения. Никакой подпитки не требуется, чтобы возбуждение дополнительных полюсов удовлетворяло наивыгоднейшим условиям коммутирования.

В случае кривой рис. 146, б возбуждение дополнительных полюсов слишком слабо, приходится подпитывать полюсы для того, чтобы возбуждение их соответствовало наивыгоднейшим условиям коммутирования. Без подпитки искрение получится уже при нагрузке, превышающей номинальную на 30%, тогда как предел коммутирующей способности машины лежит при 240% номинального тока.

Необходимо увеличить коммутирующее поле путем уменьшения воздушного зазора под дополнительными полюсами или увеличением числа витков его обмотки.

При наличии кривых подпитки, согласно рис. 146, в, возбуждение дополнительных полюсов слишком сильно, так как приходится давать отрицательную подпитку (уменьшать ток возбуждения дополнительных полюсов) для того, чтобы иметь наивыгоднейшие условия коммутирования. Необходимо шунтировать обмотку дополнительных полюсов, увеличить зазор или отмотать часть витков возбуждения.

Рассмотрение кривых рис. 146 дает, таким образом, возмож-

ность судить о том, каково возбуждение дополнительных полюсов. Какое из трех возможных мероприятий применить для установления правильного возбуждения в случае получения кривых, согласно рис. 146, *b* и *c*, приходится решать в каждом конкретном случае.

В случае машин малой мощности представляется возможным добавить или снять некоторое число витков с дополнительных полюсов, так как число витков здесь достаточно велико. Новое необходимое число витков определится из формулы:

$$w' = w \frac{I_a \pm i_d}{I_a} = w \left(1 \pm \frac{i_d}{I_a} \right), \quad (155)$$

где: w — первоначальное число витков, $\left. \begin{matrix} I_a = 0m \\ i_d = mb \end{matrix} \right\}$ рис. 146, *b* и *c*.

В машинах значительной мощности число витков на каждом дополнительном полюсе невелико (порядка 1—5), и необходимое изменение витков, диктуемое кривой подпитки, получается порядка долей витка. В этом случае можно при чрезмерно сильных полюсах шунтировать их обмотку дополнительным сопротивлением. Необходимая величина шунтирующего сопротивления R определится из выражений:

$$\begin{aligned} I_a &= I_a - i_d + i, \\ (I_a - i_d) r_d &= iR, \end{aligned}$$

где: i — ток в шунте, r_d — сопротивление обмотки добавочных полюсов.

Отсюда имеем:

$$R = r_d \left(\frac{I_a}{i_d} - 1 \right). \quad (156)$$

В случае слишком слабых дополнительных полюсов приходится в больших машинах уменьшать воздушный зазор под этими полюсами.

Для нахождения величины нового зазора имеем равенство:

$$\Delta W_c - \Delta W_g = 0,8 B_c k_c \delta_c,$$

где: ΔW_c — полное число ампервитков дополнительных полюсов (на полюс), ΔW_g — поперечные ампервитки реакции якоря (на полюс), B_c — новое значение индукции под дополнительным полюсом, k_c — коэффициент Картера для дополнительных полюсов, δ_c — новый воздушный зазор под дополнительным полюсом.

С другой стороны, при неизменном воздушном зазоре получаем, на основании кривой подпитки, новое необходимое число ампервитков ΔW_c и равенство для определения нового значения индукции:

$$\Delta W_c - \Delta W_g = 0,8 B_c k_c \delta_c,$$

откуда:

$$B_c = \frac{\Delta W_c - \Delta W_g}{0,8 k_c \delta_c}.$$

Подставляя значение B_{c_2} в предыдущее равенство и решая его относительно δ_{c_2} , имеем:

$$\delta_{c_2} = \delta_{c_1} \frac{AW_{c_1} - AW_g}{AW_{c_1} - AW_g};$$

ввиду того, что:

$$AW_{c_1} = AW_{c_1} \frac{I_a \pm i_d}{I_a},$$

имеем:

$$\delta_{c_2} = \delta_{c_1} \frac{AW_{c_1} - AW_g}{AW_{c_1} \frac{I_a \pm i_d}{I_a} - AW_g}.$$

Обозначая отношение:

$$\frac{AW_{c_1}}{AW_g} = A_c,$$

имеем:

$$\delta_{c_2} = \frac{\delta_{c_1}}{1 \pm \frac{i_d}{I_a} \frac{A_c}{A_c - 1}}. \quad (157)$$

Приведем пример расчета для конкретной машины¹⁾.

Пример. Электродвигатель мощностью в 1500 лс при напряжении в 600 В, номинальном токе 2000 А при 750 об/мин имеет 116 пазов на якоре при 6 проводниках в пазу. Число полюсов машины — 8, обмотка простая петлевая. Числа витков дополнительных полюсов и компенсационной обмотки — 4 и 3. Воздушный зазор под дополнительными полюсами $\delta_{c_1} = 18$ мм.

В результате снятия кривых безискровой зоны при подпитке дополнительных полюсов выяснилось, что последние слабы и необходимо увеличить ток в дополнительных полюсах на 2,9%. Необходимое новое число витков оказывается равным:

$$w' = w \left(1 \pm \frac{i_d}{I_a}\right) = 7 \left(1 + \frac{2,9}{100}\right) = 7,2 \text{ витка},$$

что практически осуществлено быть не может. Остается уменьшить воздушный зазор. Значение A_c получается:

$$A_c = \frac{AW_c}{AW_g} = \frac{AW_{c_1} + AW_{cm}}{AW_g} = \frac{2p(w_{c_1} + w_{cm})I_a}{\frac{N}{4a} \cdot \frac{I_a}{2a} 2p}, \quad A_c = \frac{8(4+3)}{\frac{116 \cdot 6}{4 \cdot 4}} = 1,286.$$

Здесь AW_c — суммарные ампервитки дополнительных полюсов и компенсационной обмотки.

Воздушный зазор:

$$\delta_{c_2} = \frac{\delta_{c_1}}{1 \pm \frac{i_d}{I_a} \frac{1,286}{1,286 - 1}} = \frac{\delta_{c_1}}{1 \pm 4,5 \frac{i_d}{I_a}}, \quad \delta_{c_2} = \frac{18}{1 + 4,5 \frac{2,9}{100}} = 16 \text{ мм}.$$

¹⁾ В. Т. Касьянов, Электричество, 1934, № 20, стр. 7.

ГЕНЕРАТОРЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

1. Введение.

Вопросом коммутации тока и анализом средств ее улучшения мы закончили рассмотрение общих вопросов, лежащих в основе любой электрической машины постоянного тока, будь то двигатель или генератор любого способа возбуждения. Рассмотрим теперь отдельно свойства двигателей и генераторов, причем последних в условиях как одиночной, так и совместной работы.

Свойства генераторов постоянного тока сильно разнятся в зависимости от способа возбуждения, ввиду чего приходится рассматривать машину каждого способа возбуждения отдельно. Наиболее простым, с точки зрения условий работы, является генератор независимого возбуждения, так как он имеет цепь возбуждения, питаемую от отдельного источника, и следовательно, свойства этой цепи никак не зависят от свойств самой машины. Свойства любой электрической машины легче всего выясняются при помощи кривых, характеризующих зависимость между какими-либо двумя основными величинами при неизменных остальных. Такими величинами являются: напряжение на зажимах машины U и сила тока в якоре I_a , сила тока в цепи возбуждения i_e , число оборотов якоря в минуту n , а также угол сдвига щеток из нейтральной линии β . Последние две величины практически почти всегда остаются неизменными, n выбирается равным номинальному для данной машины числу оборотов в минуту и β устанавливается в наиболее выгодное для хорошей коммутации положение (для машин без добавочных полюсов). Ввиду этого представляет интерес работа машин при переменных U , I_a и i_e , изменение которых мы и будем только рассматривать.

а) Полагая $I_a = \text{const}$, имеем зависимость $U = f(i_e)$ или так называемые нагрузочные характеристики. В частном случае, когда $I_a = 0$, имеем $U_0 = f(i_e)$ в виде характеристики холостого хода. Эта последняя кривая имеет особое значение для любого генератора.

б) Если $i_e = \text{const}$, то получаем зависимость $U = f(I_a)$, что соответствует внешним характеристикам. Наибольшие значения имеют здесь две кривые: одна, снятая при i_e , соответствующем $U = U_N$ в холостом ходу машины, и другая, снятая при i_e , соответствующем тому же номинальному напряжению машины, но уже под полной нагрузкой.

в) При $U = \text{const}$ имеем зависимость $i_e = f(I_a)$ в виде регулировочных характеристик. Обычно представляет интерес лишь кривая при $U = U_N$. Имеет также большое значение кривая, снятая при $U = 0$, что дает характеристику короткого замыкания машины.

2. Характеристики холостого хода и нагрузочные.

Приведя генератор во вращение с нормальной скоростью и питая обмотку возбуждения от особого источника при разомкнутой внешней цепи, легко снять зависимость $U_0 = f(i_e)$ постепенно, меняя возбуждающий ток помощью реостата, включенного по схеме рис. 147. Снятие характеристики холостого хода можно начать со значения $i_e = 0a$ (рис. 148), что соответствует такому значению U_0 , которое превышает номинальное значение напряжения на 10—15% (точка b). После этого, уменьшая ток возбуждения в одном и том же направлении, возвращаемся к исходному положению, устанавливая в конце опыта $i_e = 0$.

Изменив направление тока в обмотке возбуждения, снимаем нижнюю ветвь кривой до точки b' . Соответствующая кривая дана на рис. 148. Восходящую ветвь получают простым

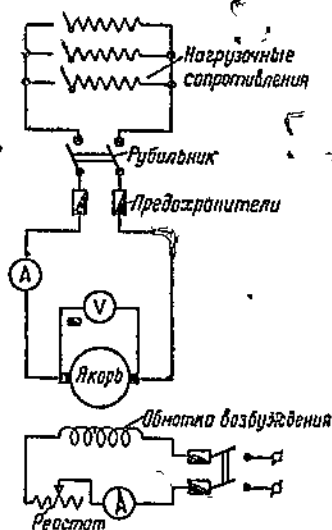


Рис. 147.

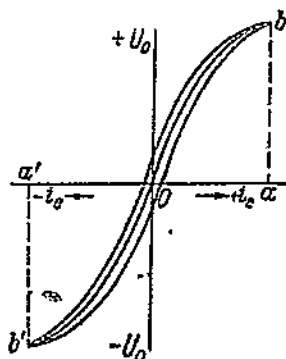


Рис. 148.

поворотом первой ветви на 180°. Легко сообразить, конечно, что полученная кривая будет являться не чем иным, как кривой намагничения со всеми ее характерными особенностями, обусловленными явлением гистерезиса и насыщением. Она будет характеризовать магнитные свойства тех материалов, из которых изготовлена магнитная цепь машины. Так, максимальная разность ординат восходящей и нисходящей ветвей кривых рис. 148 составляет при ярме и полюсах из литой стали 2—3%, тогда как при чугунном ярме и полюсах имеем значения порядка 5—6%.

Уклон прямолинейной части кривой определяется числом ампервитков, необходимых для проведения магнитного потока через междужелезное пространство: чем больше будет этот уклон, тем больше будет δ .

Характеристика холостого хода приобретает особое значение не только потому, что дает возможность судить о магнитных свойствах машины, но и ввиду возможности построить, поль-

заясь ею, другие характеристики. Рассматривая характеристику холостого хода с этой точки зрения, нет особой необходимости снимать весь шлейф кривой, а достаточно для построений ограничиваться средней кривой рис. 148.

Отметим также, что при снятии характеристики холостого хода нет надобности строго поддерживать постоянство скорости, а необходимо лишь регистрировать эту скорость n_0 для каждой точки кривой U_0 . Тогда, очевидно, э. д. с. машины при номинальном числе оборотов будет равна:

$$U_{0N} = U_0 \frac{n_N}{n_0}.$$

При снятии кривой следует вести изменение тока в одном направлении.

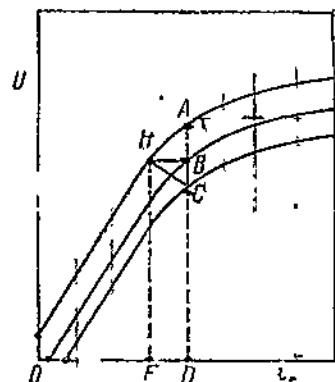


Рис. 149.

От характеристики холостого хода легко перейти к собственно нагрузочным кривым. Они имеют, впрочем, меньшее практическое значение. Известный интерес эти характеристики представляют с учебной точки зрения, позволяя применить при их анализе приобретенные познания в области теории машин.

Если работающую вхолостую машину при возбуждении $i_a = OD$ (рис. 149) замкнуть на некоторое внешнее сопротивление, то по обмотке якоря и щеткам пройдет ток I_a . Явление прохождения этого тока будет сопровождаться как падением напряжения в якоре и контакте щеток $I_a r_a + 2e_R = I_a R_a$, так и возникновением якорного поля. Это вызовет при нормальном положении щеток уменьшение напряжения на зажимах машины, которое получит значение $U_N = DC$, в то время как при холостом ходе напряжение было $U_0 = DA$. Разность $CA = \Delta E$ представляет собой, очевидно, падение напряжения, обусловленное реакцией якоря и сопротивлением главной цепи машины. Прибавляя к напряжению U_N падение $I_a R_a$, соответствующее данному значению тока (сопротивление R_a может быть измерено отдельно помощью, хотя бы, моста Витстона при неподвижном якоре машины), имеем точку B. Отрезок DB представит тогда собой внутреннюю, индуктированную результирующим полем э. д. с. машины E.

Данному значению э. д. с. будет соответствовать точка H на характеристике холостого хода при ампервитках возбуждения OF (ампервитки возбуждения отложены здесь, как и везде в дальнейшем, в масштабе тока возбуждения). Эти ампервитки меньше тех, какие дает $i_a - OD$. Так как магнитное состояние машины не зависит от того, в какой части ее магнитной цепи расположить индуктирующие ампервитки, то, очевидно, безразлично,

каким ампервиткам создавать поле — якоря или полюсов. Ввиду этого характеристику холостого хода можно рассматривать как зависимость U_0 от результирующих ампервитков машины. Поэтому OF есть не что иное, как ампервитки результирующего поля машины при нагрузке, и разность $OD - OF$ соответствует размагничивающим ампервиткам якоря $\Delta W_a + \Delta W_p$. Отсюда можно определить эти ампервитки отрезком $FD = HB$.

Соединяя точку H с точкой C , получим так называемый реактивный треугольник, где сторона HB соответствует ампервиткам реакции якоря и BC — падению напряжения в якоре машины. Если предположить, что размагничивающие ампервитки не зависят от насыщения, т. е. что $\Delta W_p = 0$, то можно, перемещая реактивный треугольник параллельно самому себе, по-

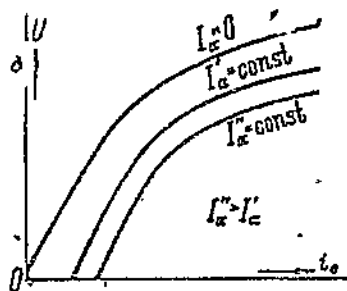


Рис. 150.

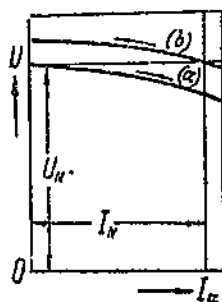


Рис. 151.

лучить нагрузочную характеристику машины для того значения тока, которому данный треугольник соответствует. Эта же кривая может быть получена опытным путем, помощью изменения возбуждения машины и установления для каждого возбуждения такого сопротивления внешней цепи, чтобы ток I_a соответствовал заданному значению. Удобнее всего, при опытном снятии характеристики, идти сверху, начиная от наибольшего напряжения машины.

Характеристики — опытная и построенная помощью реактивного треугольника — полностью совпадать, конечно, не будут, ввиду того что при построении треугольника не учтено влияние изменения насыщения на сторону его, характеризующую ампервитки реакции якоря. Сравнивая опытную и построенную характеристики, можно установить влияние реакции якоря в соответствии со всем тем, что было сказано раньше. Если снять или построить нагрузочные характеристики для различных сил токов, то получим кривые рис. 150, где дана также характеристика холостого хода.

3. Внешние характеристики, падение и повышение напряжения.

Большое практическое значение имеет вид зависимости $U = f(I_a)$ при $i_c = \text{const}$. Эта кривая характеризует устойчивость напряжения машины при изменении нагрузки.

Как было указано выше, представляют интерес две внешние характеристики, снятые при двух различных значениях тока в цепи возбуждения.

Устанавливая такой ток i_a , чтобы иметь при холостом ходе генератора напряжение на его зажимах, равное номинальному значению напряжения $U_0 = U_N$, снимаем первую из этих кривых, увеличивая постепенно нагрузку генератора. Для ряда токов якоря, равных обычно значениям $1/4 I_{aN}$, $1/2 I_{aN}$, $3/4 I_{aN}$, $1 I_{aN}$, $5/4 I_{aN}$, отсчитываем соответствующие напряжения на зажимах машины, поддерживая во все время опыта n и i_a постоянными. В результате получим кривую a (рис. 151). По мере увеличения нагрузки напряжение медленно падает; это объясняется теми же факторами, какие были указаны при рассмотрении нагрузочной характеристики, т. е. падением напряжения $I_a R_a$ и реакцией якоря. В случае машины с добавочными полюсами влияние реакции якоря будет невелико (размагничивающее сказывается лишь ΔW_p), и падение напряжения определяется, главным образом, омическим падением. Внешняя характеристика, снятая в таких условиях, дает возможность судить о том, как будет вести себя генератор, будучи возбужден и предоставлен далее самому себе (автоматический регулятор первичного двигателя поддерживает практически постоянную скорость; ток же возбуждения, будучи взят от отдельного источника, например аккумуляторной батареи, сохраняет полное постоянство). Количественно можно характеризовать генератор величиной относительного падения напряжения ξ , понимая под этим:

$$\xi\% = \frac{U_0 - U}{U_0} 100, \quad (158)$$

где U — напряжение на зажимах машины при номинальном значении тока нагрузки.

Вторая из внешних характеристик снимается, начиная уже не с холостого хода, а с полной нагрузки генератора, причем возбуждение i_a выбирают таким, чтобы было $U = U_N$. Разгружая затем генератор, наблюдают за повышением напряжения на его зажимах вплоть до полной разгрузки (холостого хода машины). На рис. 151 кривая b дает возможность судить о характере получающейся кривой. Количественно повышение напряжения характеризуют величиной:

$$\varepsilon\% = \frac{U - U_N}{U_N} 100. \quad (159)$$

Повышение напряжения обычно меньше падения вследствие большего насыщения магнитной цепи машины¹⁾. Как видно, вторая внешняя характеристика отличается от первой лишь повышенным значением тока в цепи возбуждения. Величина ε

¹⁾ Отметим, что нормы предписывают характеризовать генератор „изменением напряжения“ при переходе от полной нагрузки к холостому ходу, т. е. повышением напряжения.

бывает в нормальных машинах порядка 7—12% при отсутствии добавочных полюсов и 5—8% при их наличии.

Любая из внешних характеристик может быть легко построена графически с помощью характеристики холостого хода и реактивного треугольника.

На рис. 152 дано такое построение для случая падения напряжения. Характеристика холостого хода представлена здесь в виде кривой зависимости $U_0 = f(i_e)$. Пусть c — точка этой кривой, соответствующая $U_0 = U_N$. Строим при этой точке реактивный треугольник для номинального значения тока якоря, откладывая bc — омическое падение напряжения (вычислено по измеренному R_a) и ab — ампервитки реакции якоря. Эти ампер-

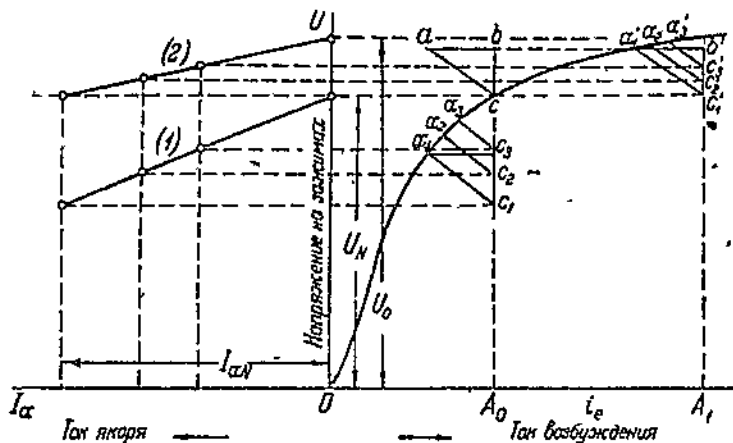


Рис. 152.

витки могут быть определены из расчета машины и отложены в масштабе тока возбуждения i_e или же найдены опытным путем с помощью нагрузочной характеристики, как было указано выше. Чаще всего, однако, пользуются для определения этого катета треугольника характеристикой короткого замыкания (см. далее). Построив реактивный треугольник, смещаем его параллельно оси ординат до тех пор, пока точка a не совпадет с характеристикой холостого хода в точке a_1 ; тогда точка c_1 определит напряжение при номинальной нагрузке $A_0 c_1 = U$.

Для определения значений напряжения машины при других токах нагрузки необходимо изменить стороны реактивного треугольника пропорционально току и вновь поставить этот треугольник в такое положение, чтобы точка a_2 совпала с некоторой точкой характеристики холостого хода. Точка c_2 реактивного треугольника должна лежать попрежнему на вертикальной прямой, проведенной от оси ординат на расстоянии, равном тому значению тока возбуждения, для которого строится внешняя характеристика. Ордината точки c_2 определит тогда новое значение напряжения.

Практически нет никакой надобности строить вновь реактивный треугольник. Достаточно провести прямые между характеристикой холостого хода и прямой A_0c параллельно гипотенузе реактивного треугольника, построенного для номинального значения тока. Отношение:

$$\frac{c_2a_2}{c_1a_1} = \frac{I}{I_N}$$

определит тогда значение тока I для каждой гипотенузы нового треугольника, а точки c_2 , c_3 и т. д. определяют новые значения напряжений.

Имея эти напряжения и соответствующие им токи, строим внешнюю характеристику (I) в левом квадранте (рис. 152), сняв значения напряжений и откладывая их по ординатам для соответствующих токов.

В случае построения внешней характеристики в предположении номинального значения напряжения при номинальном токе (повышение напряжения) приходится первоначально поставить реактивный треугольник, определенный для номинального тока нагрузки, в такое положение, чтобы точка c его лежала на прямой, имеющей ординаты, равные U_N (точка c'), а точка a на характеристике холостого хода (точка a'). Тем самым определится необходимое значение тока возбуждения OA_1 и напряжение при холостом ходе U_0 . В дальнейшем построение ничем не отличается от такового же, разобранного ранее для случая номинального напряжения при холостом ходе. Внешняя характеристика нанесена в левом квадранте (кривая 2).

4. Характеристики — регулировочная и короткого замыкания.

Знание регулировочной характеристики генератора $i_e = f(I_a)$ при $U = \text{const}$ необходимо для выбора регулятора, с помощью которого производится поддержание постоянства напряжения на зажимах машины. Так как при увеличении нагрузки напряжение машины имеет тенденцию падать, то для поддержания его постоянства необходимо увеличивать ток в цепи возбуждения по мере увеличения нагрузки. При этом чем больше будет насыщение машины, тем круче будет подниматься регулировочная кривая (рис. 153), так как для компенсации падения напряжения при насыщении машины необходимо большее число ампервитков. Очевидно, что практическое значение имеет лишь характеристика при $U = U_N$.

Совершенно особый характер носит кривая, снятая при напряжении $U = 0$. Эта кривая носит название характеристики короткого замыкания ввиду того, что может быть снята лишь при ко-

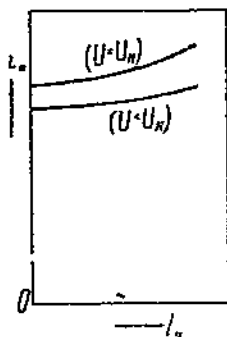


Рис. 153.

ротком замыкании внешних зажимов машины проводником минимального сопротивления. Принимая это сопротивление $R=0$, имеем $U=IR=0$, независимо от значения тока I .

Если дать такой короткозамкнутой машине нормальное возбуждение, то ток якоря будет чрезмерно велик вследствие малого сопротивления последнего. Реакция якоря в этом случае хотя и будет уменьшать магнитное поле машины, но все же ток получит весьма большое значение. Ввиду этого необходимо при снятии характеристики короткого замыкания уменьшить возбуждение до таких его значений, чтобы ток короткого замыкания не превосходил номинального тока.

Для установления вида характеристики короткого замыкания обратим внимание на то, что при коротком замыкании вся индуктированная в машине электродвижущая сила E_k идет на покрытие падения напряжения:

$$E_k = I_{ak} R_a$$

Ввиду того, однако, что $E_k = U_0 = f(i_e)$ изменяется по кривой намагничивания, $I_{ak} = f(i_e)$ изменяется по той же кривой, если принять, что $R_a = \text{const}$. Итак, характеристика короткого замыкания имеет вид кривой намагничивания. Так как эту характеристику снимают лишь при малых токах в цепи возбуждения, то она представляется прямой линией, в соответствии с такой же прямолинейной частью характеристики холостого хода. На рис. 154 дана характеристика короткого замыкания.



Рис. 154.

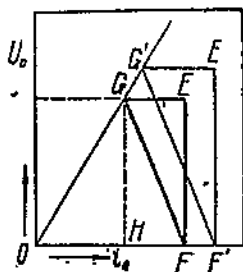


Рис. 155.

Рассматривая ампервитки OF , соответствующие некоторой точке этой характеристики, можем заранее установить, что они должны складываться из двух частей, а именно: часть их должна идти на компенсацию реакции якоря от тока I_{ak} , другая же часть — на индуктирование такой э. д. с. в машине, которая скомпенсировала бы падение напряжения $I_{ak} R_a$. Вторую часть ампервитков нетрудно определить, если воспользоваться характеристикой холостого хода той же машины, для которой снята характеристика короткого замыкания.

В самом деле, вычислив для данного значения тока I_{ak} величину падения $I_{ak} R_a$, ищем по характеристике холостого хода (рис. 155) равную этому падению величину (GH на рис. 155) и соответствующие этой электродвижущей силе E_k ампервитки OH . Вычитая затем из полных ампервитков, необходимых при коротком замыкании для создания тока I_{ak} (ампервитки OF рис. 154), ампервитки OH , имеем HF в виде ампервитков реакции якоря. Все данные для построения реактивного треугольника налицо. Откладывая ампервитки $HF = GE$ от точки G характе-

ристки холостого хода (рис. 155) параллельно оси абсцисс, опуская из точки E перпендикуляр $EF = I_{ak}R_a$ и соединяя точку G с точкой F , имеем реактивный треугольник.

Пользуясь этим треугольником, нетрудно построить все характеристики, рассмотренные выше, а также определить тот ток короткого замыкания, который установится в машине при любом возбуждении. Для этого достаточно построить треугольник при точке оси абсцисс, соответствующей данному значению тока возбуждения i_c (рис. 155, точка F'). Необходимо только, чтобы точка G' его упала на характеристику холостого хода и соотношение сторон осталось тем же, что и при первоначальном его построении. Тогда получаем треугольник $F'G'E'$. Точка E' этого треугольника принадлежит характеристике короткого замыкания, пересчитанной на масштаб падения напряжения $I_{ak}R_a$, т. е. сторона $F'E'$ пропорциональна току короткого замыкания I'_{ak} . Значение этого тока найдем из отношения:

$$\frac{I'_{ak}}{I_{ak}} = \frac{F'E'}{FE} = \frac{G'F'}{GF}.$$

Таким образом I'_{ak} легко определяется, если из точки F' , соответствующей заданному значению тока возбуждения, провести прямую $G'F'$ параллельно стороне треугольника GF до пересечения с характеристикой холостого хода.

Реактивный треугольник, построенный с помощью характеристики короткого замыкания, не учитывает размагничивающего действия поперечных ампервитков якоря, так как снятие характеристики короткого замыкания ведется при слабом насыщении магнитной цепи машины.

Отметим, что характеристику короткого замыкания приходится часто снимать и для машин, работающих нормально в схеме самовозбуждения, переделывая схему на независимое возбуждение, ибо только при этом способе возбуждения данная характеристика может быть снята. Возможность построить, пользуясь ею, реактивный треугольник ценна и для машин с самовозбуждением. Опыт короткого замыкания имеет особое значение потому, что с его помощью можно определить изменение напряжения—величину, характеризующую работу машины при нагрузке, не производя самого опыта нагрузки, который при приемке—сдаче машин, особенно большой мощности, нередко представляет затруднения.

5. Особенности характеристики шунтового генератора.

К генератору независимого возбуждения ближе всего подходит по своим свойствам машина с параллельным или шунтовым возбуждением. Согласно схеме рис. 156, генератор этот получает ток в цепь возбуждения с собственных зажимов, ввиду чего отпадает необходимость отдельного источника тока для питания этой цепи.

Наличие собственного возбуждения налагает на всю работу машины своеобразный отпечаток ввиду того, что ток возбуждения претерпевает изменения вместе с изменением напряжения на зажимах машины.

Характеристика холостого хода этого типа генератора имеет, конечно, практически ту же форму и свойства, что и при независимом возбуждении (см. рис. 148). Разница лишь в том, что для шунтового генератора нельзя получить таких условий работы, когда $I_a = 0$.

Ввиду питания цепи возбуждения от собственных зажимов в якоре всегда есть ток, составляющий небольшой процент от номинального тока, даже при разомкнутой внешней цепи, так как ток возбуждения всегда замыкается через якорь. Поэтому и при холостом ходе, строго говоря, имеется некоторое небольшое падение напряжения в якоре и реакция его. Вследствие относительной малости тока возбуждения даже при нормально возбужденной машине (2—3% от I_{aH}) можно влиянием тока возбуждения на падение напряжения пренебречь и считать, что при холостом ходе напряжение $U = U_0$, т. е. равно э. д. с., индуцированной в якоре.

При этом кривая холостого хода, снятая в одном квадранте, почти не отличается от таковой, снятой при независимом возбуждении. Снять весь цикл намагничивания здесь, конечно, не представляется возможным, так как направление э. д. с. фиксировано направлением остаточного поля.

Характеристику холостого хода (рис. 157) здесь снимают, обычно, сверху вниз, начиная от напряжения, превышающего номинальное на 20—25%, и затем, доведя ток возбуждения до нуля, увеличивают вновь возбуждение, доводя напряжение до первоначального значения. За истинную кривую принимают среднюю, проведенную между двумя полученными опытным путем кривыми.

Снятие характеристики холостого хода требует здесь, однако, большей тщательности, чем при независимом возбуждении. Прежде всего, необходимо строгое постоянство скорости вращения генератора. При изменении скорости будет меняться и напряжение на зажимах машины, а следовательно, и ток в цепи возбуждения; при возвращении к прежней скорости

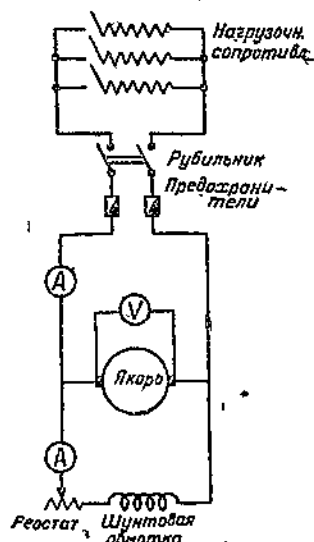


Рис. 156.

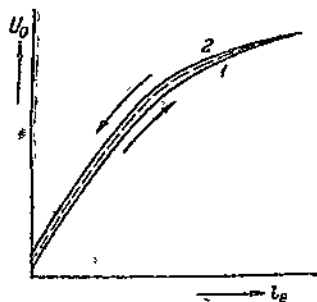


Рис. 157.

получится изменение напряжения и тока в цепи возбуждения в противоположном направлении, что будет сопровождаться переходом на другой цикл намагничивания и исказит результат измерений. Кроме того, здесь необходима большая тщательность в изменении сопротивления того реостата цепи возбуждения, которым ведется регулирование. Следует помнить, что небольшим сдвигом движка реостата может сопровождаться значительным изменением тока возбуждения и напряжения машины, в особенности при нахождении на прямолинейной части кривой холостого хода.

Нагрузочные характеристики ничем почти не отличаются от таковых же генератора независимого возбуждения. Разница получается опять-таки за счет пренебрежимо малой величины падения напряжения от тока возбуждения.

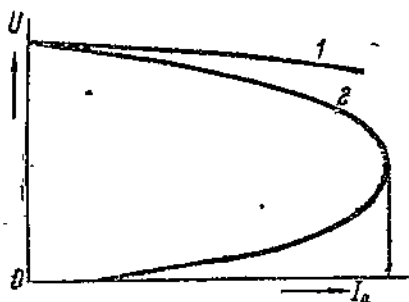


Рис. 158.

Внешняя характеристика, однако, значительно расходится с таковой независимого возбуждения. Происходит это потому, что к двум основным причинам падения напряжения — омическому падению и реакции якоря — прибавляется изменение напряжения вследствие изменения напряжения на зажимах машины. Дело в том, что для машины независимого возбуждения мы снимали эту кривую при $i_e = \text{const}$, между тем как теперь, естественно, должны поддерживать не $i_e = \text{const}$, а $r_e = \text{const}$, где r_e — сопротивление цепи возбуждения.

Сравнительные характеристики одной и той же машины, работающей с независимым и собственным возбуждением, даны на рис. 158. Здесь 1 — кривая внешней характеристики $U = F(I_a)$ при независимом возбуждении и 2 — при собственном. Как видно, кривая 2 проходит значительно ниже 1 и, кроме того, получает характерный загиб после определенной силы тока, называемой „критической“.

Каждому значению силы тока соответствуют два значения напряжения: одно отвечает верхней устойчивой части характеристики, другое — нижней неустойчивой. По мере увеличения нагрузки шунтового генератора, начиная от холостого хода его, ток постепенно возрастает, а вместе с ним возрастают омическое падение напряжения и реакция якоря. Напряжение на зажимах при этом уменьшается. Падение напряжения влечет за собой уменьшение возбуждающего тока, что еще более снижает напряжение.

Уменьшение напряжения на зажимах машины вызывает некоторое падение силы тока, отдаваемого машиной в сеть, однако до величины, лишь немного меньшей той, какая устанавливается в первый момент после уменьшения сопротивления внешней цепи. В результате ток все же возрастает. Так продолжается до

гих пор, пока, несмотря на уменьшающееся значение магнитного потока вследствие падения тока в цепи возбуждения, машина все же достаточно насыщена. При дальнейшем увеличении нагрузки уменьшение потока пойдет резче вследствие перехода э. д. с. машины на прямолинейную часть характеристики холостого хода. Это устанавливает известный предел увеличению тока машины. При переходе за этот предел уменьшение внешнего сопротивления не будет уже сопровождаться конечным увеличением тока, так как падение напряжения на зажимах машины и ее э. д. с. пойдет быстрее, чем уменьшение внешнего сопротивления; отсюда очевидно падение тока и переход на нижнюю ветвь характеристики. Эта ветвь является неустойчивой, так как машина работает здесь при весьма малом магнитном поле, насыщена слабо и все изменения внешнего сопротивления резко сказываются на ее напряжении.

При полном коротком замыкании зажимов машины получим точку характеристики, лежащую на оси абсцисс (т. е. получим $U=0$ при $I_a = I_{ak}$). Ток в цепи возбуждения будет, очевидно, отсутствовать, но благодаря остаточному полю в якоре будет индуцироваться некоторая э. д. с., которая и вызовет небольшой ток I_{ak} . Отсюда очевидно, что полное короткое замыкание для шунтового генератора не так опасно, как для машины независимого возбуждения, ибо ток быстро падает почти до нуля. Отметим, однако, что такое короткое замыкание обычно сопровождается относительно кратковременным искрением на коллекторе при переходе тока через свое наибольшее значение. Кроме того, падение величины тока до значения I_{ak} идет не очень быстро вследствие самоиндукции цепи возбуждения и задержки падения тока в этой цепи, а следовательно, э. д. с. и тока в якоре машины. Поэтому короткого замыкания необходимо и здесь всемерно избегать.

Обращаясь вновь к внешней характеристике машины, можем установить, что практически работа на верхней части характеристики, близкой к перегрузу, а тем более на неустойчивой нижней части кривой, недопустима. Вследствие этого шунтовую машину надлежит всегда делать достаточно насыщенной, чтобы значение номинального тока машины не лежало близко к значению „критического тока“, составляя $\frac{1}{3}$ — $\frac{1}{2}$ его. Изменение напряжения у шунтовой машины будет, однако, порядка 12—20% в машинах без добавочных полюсов и 8—15% при наличии добавочных полюсов, т. е. больше, чем при независимом возбуждении.

Переходя к опытному определению изменения напряжения, можно указать, что здесь, как и ранее, возможно применить способ непосредственной нагрузки генератора, а также способ косвенного определения помощью характеристики холостого хода и реактивного треугольника. Этот последний должен быть предварительно построен на основании опыта короткого замыкания, для чего необходимо дать слабое возбуждение машине (например от аккумуляторов), замкнув ее накоротко и отсоединив шунт от зажимов машины.

Для построения внешней характеристики строим характеристику холостого хода (см. рис. 159) и в точке ее, отвечающей номинальному значению напряжения, помещаем поперечному реактивный треугольник abc . Ввиду того что при самовозбуждении имеем уже не постоянство тока в цепи возбуждения, а только постоянство сопротивления r_e этой цепи, необходимо учесть зависимость изменения тока возбуждения i_e от напряжения на зажимах. Последнее может быть сделано на основании закона Ома:

$$i_e = \frac{U}{r_e}. \quad (160)$$

Отсюда видно, что при изменении U ток возбуждения изменяется по прямой, причем тангенс угла уклона этой прямой к оси абсцисс

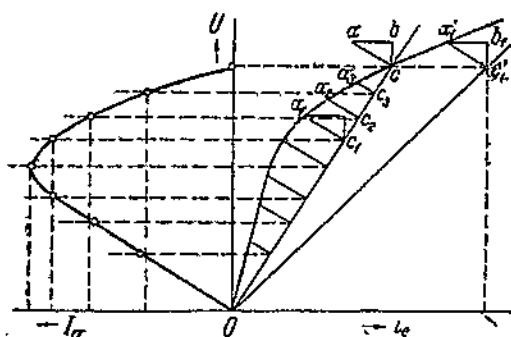


Рис. 159.

$$\operatorname{tg} \alpha = r_e,$$

т. е. определяется всецело сопротивлением цепи возбуждения. Поскольку, однако, ток возбуждения линейно зависит от напряжения машины, все возможные для данного значения r_e напряжения машины будут находиться на прямой Oc , проведенной под углом α к оси абсцисс. О выборе

величины этого угла скажем в дальнейшем.

Поскольку прямая $U = i_e r_e$ определяет возможные напряжения машины независимо от того, нагружена она или работает вхолостую, постольку и характеристика холостого хода определяет те же напряжения, но в холостом ходе машины. Обе зависимости — как $U = f_1(i_e)$, так и $U_0 = f_2(i_e)$ — должны быть, очевидно, удовлетворены одновременно, чтобы вообще возможно было получение напряжения от машины при холостом ходе ее. Отсюда напряжение это при данном r_e определится пересечением прямой падений напряжения в цепи шунта с характеристикой холостого хода, в данном случае (рис. 159) точкой c .

Сопротивление цепи шунта, а следовательно, и угол α уклона прямой падений были выбраны нами так, чтобы при холостом ходе получить номинальное напряжение. Меняя r_e , т. е. уклон прямой, получим различные точки пересечения с характеристикой холостого хода и различные значения в. д. с. при холостом ходе. Для определения изменения напряжения при номинальной нагрузке остается переместить реактивный треугольник в такое положение, чтобы точка a попала на характеристику холостого хода, тогда как точка c совместилась бы с прямой

падений. Положение треугольника $a_1b_1c_1$ удовлетворяет этим условиям. Отсюда — точка c_1 определит напряжение машины при номинальной нагрузке. Для нахождения точек внешней характеристики, отвечающих другим токам нагрузки, перемещаем реактивный треугольник, изменяя одновременно его величину пропорционально току. Как и в случае построения внешней характеристики при независимом возбуждении, достаточно провести прямые, параллельные гипотенузе основного реактивного треугольника, между характеристиками холостого хода и прямой падения напряжения в цепи шунта. Точки c_1 , c_2 и c_3 определяют тогда напряжение при нагрузке. Соответствующий ток определится из выражения:

$$I = I_N \frac{a_2c_2}{a_1c_1}.$$

Как видно из построения рис. 159 и сравнения его с рис. 152, падение напряжения получается здесь больше, чем при прочих равных условиях и независимом возбуждении. В случае построения внешней характеристики, отвечающей разгрузке машины, поступаем так. Перемещаем реактивный треугольник abc в положение $a'_1b'_1c'_1$ по прямой, параллельной оси абсцисс, соответствующей номинальному напряжению. Точка c'_1 определит значение тока возбуждения при нагрузке, а также номинальную величину этого тока. Необходимое сопротивление цепи шунта найдется, если соединить эту точку с началом координат прямой Oc_1 . Продолжив эту прямую до пересечения с характеристикой холостого хода, получим ту в. д. с., которая установится в холостом ходу машины после сбрасывания нагрузки.

Для нахождения промежуточных точек характеристики поступаем так же, как и в предыдущем случае.

Регулировочная характеристика шунтового генератора практически почти не отличается от таковой же генератора с независимым возбуждением.

6. Особенности характеристик сериесного генератора.

При обтекании главным током цепи возбуждения, включенной последовательно с якорем (схема рис. 160), напряжение на зажимах сериесной машины резко изменяется с изменением тока нагрузки. Ввиду этого последовательный генератор не находит себе применения для питания обычных силовых и осветительных сетей, где необходимо постоянство напряжения. Машины последовательного возбуждения применяли в высоковольтных передачах постоянного тока, где требовалось последовательное соединение ряда машин в целях получения высокого напряжения. Такие передачи были осуществлены в Швейцарии еще в начале текущего столетия и работают исправно до сих пор. В настоящее время вновь возник интерес к установкам с последовательно соединенными генераторами ввиду необходимости получить высокое напряжение постоянного тока для передачи на расстояние порядка 1000 km.

Характеризовать серийный генератор можно только одной кривой зависимости $U=f(I_a)$ при $n=\text{const}$, т. е. внешней характеристикой. Все остальные кривые, как-то: холостого хода, нагрузочные, короткого замыкания — могут быть сняты на этой машине лишь в том случае, если, отсоединив обмотку возбуждения от якоря, дать ей независимое питание. Ввиду малого сопротивления обмотки возбуждения, обтекаемой в нормальной схеме полным током, необходимо приложить к ее зажимам весьма низкое напряжение для получения требуемого тока. Характеристики холостого хода и короткого замыкания приходится обычно снимать, если хотят получить реактивный треугольник и построить внешнюю характеристику, не производя опыта непосредственной нагрузки машины.

Для этого наносим характеристику холостого хода (кривая 1) на график (рис. 161), по оси абсцисс которого отложен ток возбуждения i_e . Этот ток равен

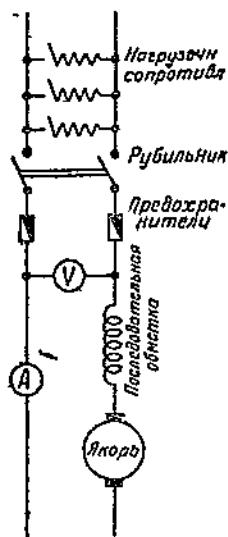


Рис. 160.

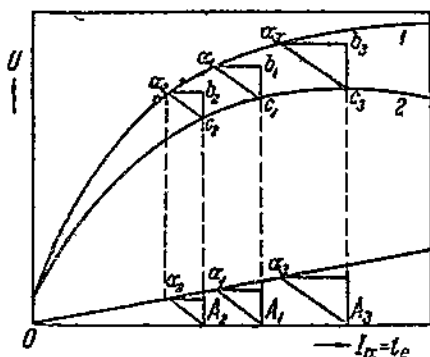


Рис. 161.

в данном случае тому току якоря I_a , который получится в нормальной схеме последовательного соединения обмоток якоря и возбуждения. Строим затем реактивный треугольник $a_1b_1c_1$ для некоторого значения тока $i_{e1}=I_{a1}$,¹⁾ располагая катет его b_1c_1 на ординате, соответствующей данному значению тока. При этом точка a_1 треугольника должна лежать на характеристике холостого хода. Точка c_1 определит тогда напряжение машины при нагрузке током I_{a1} .

Для получения остальных точек кривой можно пренебречь влиянием насыщения на размагничивающие ампервитки якоря

¹⁾ Необходимо отметить, что полученный из опыта короткого замыкания треугольник имеет сторону $EF=I_aR_a$ (рис. 155); здесь же необходимо, чтобы $b_1c_1=I_aR_a+I_aR_s$, где R_s — сопротивление последовательной обмотки возбуждения. Ввиду этого, после определения реактивного треугольника из характеристики короткого замыкания, необходимо сторону его EF увеличивать на величину I_aR_s , оставив в то же время сторону GE неизменной.

и считать стороны треугольника пропорциональными току. В таком случае любому току I_a будет соответствовать подобный же треугольник $a_2b_2c_2$ с отношением сторон, равным отношению токов I_{a1} и I_{a2} . Так, току $I_{a2} = OA_2$ будет соответствовать треугольник $a_2b_2c_2$, стороны которого будут меньше соответствующих сторон $a_1b_1c_1$ в отношении $\frac{I_{a2}}{I_{a1}}$. Строя его точно так же, как и ранее, получим точку c_2 и A_2c_2 , как напряжение на зажимах при нагрузке. Так же находим и остальные точки внешней характеристики, например c_3 для тока

$$I_{a3} > I_{a1}.$$

Легко видеть, что построение соответствующего реактивного треугольника упрощается, если построить основной треугольник у точки A_1 на оси абсцисс и соединить точку a_1 его с началом координат. Тогда прямая, проведенная до оси абсцисс параллельно a_1A_1 из любой точки прямой Oa_1 (или ее продолжения), например a_2A_2 , определит соответствующую OA_2 гипотенузу реактивного треугольника. Переноса гипотенузу параллельно самой себе до соприкосновения точкой a_2 с характеристикой холостого хода, получим точку c_2 , определяющую напряжение при нагрузке.

Рассматривая внешнюю характеристику последовательной машины (кривая 2 рис. 161), видим, что она весьма сходна с характеристикой холостого хода, но проходит ниже ее. Разница заключается еще в том, что кривая холостого хода все время поднимается, стремясь стать параллельной оси абсцисс, между тем как внешняя характеристика после некоторой наивысшей точки начинает падать, приходя в конце концов, при коротком замыкании зажимов, в соприкосновение с осью абсцисс. Этой точке соприкосновения ($U=0$) соответствует, однако, очень большое значение тока I_0 , ввиду чего короткое замыкание представляет для машины несомненную опасность.

7. Особенности характеристики генератора со смешанным возбуждением.

Схема для опытного исследования генератора со смешанным возбуждением дана на рис. 162. Шунтовая обмотка возбуждения присоединена здесь непосредственно к щеткам машины до присоединения к ним последовательной обмотки. Получается машина с так называемым „коротким шунтом“. Делают и „длинный шунт“, присоединяя шунтовую обмотку после последовательной. Практически разницы в поведении машины в том и другом случае не получается, ввиду чего, рассматривая характеристики, будем считать их отнесенными к обоим соединениям.

Рассматривая генератор смешанного возбуждения как такой шунтовой, в котором имеется дополнительная последовательная обмотка с небольшим числом ампервитков, предназначенная лишь для поддержания постоянства напряжения, имеем те же характеристики, что и для шунтового генератора. Характери-

стика холостого хода ничем не отличается от таковой же шунтовой машины.

Нагрузочные характеристики хотя и имеют тот же характер, но положение их несколько иное, так как намагничивающие ампервитки последовательной обмотки направлены встречно к размагничивающим ампервиткам якоря и обычно даже перекрывают их с избытком.

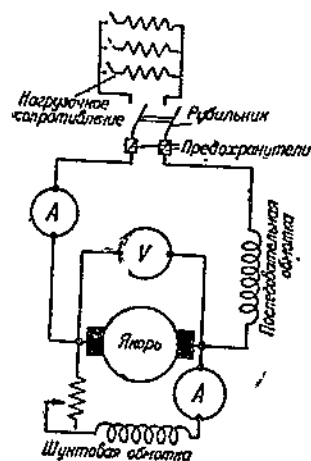


Рис. 162.

На рис. 163 показано положение одной такой характеристики. Для сравнения здесь же нанесена характеристика холостого хода. Пусть c_1b_1 — размагничивающие ампервитки реакции якоря. При ампервитках последовательной обмотки b_1b имеем не только компенсацию якорных ампервитков, но и известный избыток их c_1b , который пойдет на подмагничивание машины. Ввиду этого одна и та же индуцированная э. д. с. получается при холостом ходе при ампервитках возбуждения OC , а при нагрузке — при меньшем значении ампервитков шунтовой обмотки OB , так как недостающую часть покрывает избыток ампервитков последовательной обмотки.

Напряжение при нагрузке машины в условиях данной нагрузочной кривой будет ниже на величину ab падения в ядре машины, контакте

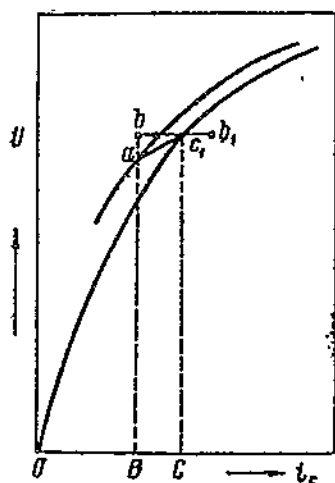


Рис. 163.

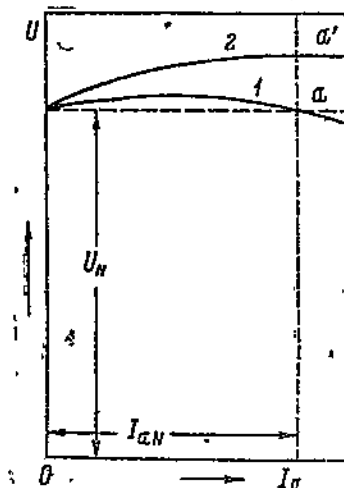


Рис. 164.

щеток и последовательной обмотке. Итак, нагрузочная характеристика при малом омическом падении ba и значительной величине bb_1 ампервитков последовательной обмотки проходит выше характеристики холостого хода, а не ниже ее, как в шун-

товом генераторе. Практическое значение нагрузочной характеристики здесь также невелико.

Что касается внешней характеристики, то вид ее тем более отличается от вида внешней характеристики шунтовой машины, чем больше число ампервитков последовательной обмотки. На рис. 164 даны две такие характеристики. Кривая 1 присуща генератору, у которого ампервитки последовательной обмотки рассчитаны так, чтобы напряжение от холостого хода до полной нагрузки было возможно постоянным; при этом как для полной нагрузки, так и при холостом ходе $U = U_N$. В промежутке имеем немного большее напряжение.

Кривая 2 построена в предположении более сильных ампервитков последовательной обмотки и отвечает так называемой гиперкомпаундной машине, когда при полной нагрузке желательно получить номинальное напряжение не на зажимах самой машины, а в каком-либо пункте, далеко от нее отстоящем. При этом излишек напряжения (aa' на рис. 164) будет потерян в фидере между машиной и питательным пунктом.

Кривая внешней характеристики может быть получена опытом непосредственной нагрузки или же путем построения, помощью характеристики холостого хода, прямой сопротивлений и реактивного треугольника. Вся разница в построении по сравнению с таковым для шунтовой машины будет лишь в том, что реактивный треугольник будет иметь один из катетов уменьшенным или даже повернутым в противоположном направлении. Сам этот треугольник может быть взят из нагрузочной кривой (треугольник abc , рис. 163), как это было показано выше, или же определен помощью комбинированного опыта короткого замыкания по методу автора.

Опыт короткого замыкания генератора со смешанным возбуждением должен быть произведен при независимом питании как параллельной его обмотки, так и последовательной по схеме рис. 165.

Для этого присоединяем сначала к сети последовательную обмотку и устанавливаем в ней помощью реостата некоторое значение тока, наблюдая в то же время за амперметром в цепи вращающегося замкнутого накоротко якоря, чтобы ток в нем не превзошел номинального значения. Пусть номинальному значению тока в последовательной обмотке I_{sN} соответствует ток якоря I_a . Включив затем параллельную обмотку, увеличиваем постепенно ее ток i_s , стремясь так изменить поле машины, чтобы ток в якоре сравнялся с током в последовательной обмотке. Тогда:

$$I_{sN} = I_{ak} = I_{aN},$$

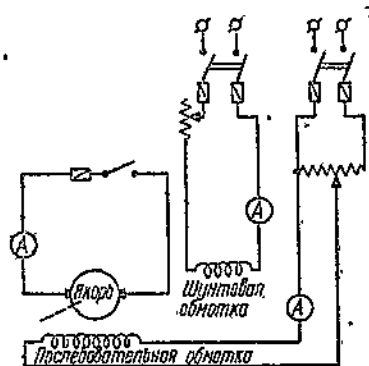


Рис. 165.

так как по условиям последовательного включения обмотки в нормальной схеме машины имеем всегда:

$$I_{sN} = I_{aN}.$$

При этом возможно, что по включении параллельной обмотки изменение тока в якоре пойдет в нежелательном направлении. В этом случае следует изменить направление тока в параллельной обмотке, переключив ее концы.

После установления одинаковых значений токов в якоре и последовательной обмотке, в машине будут действовать те же ампервитки реакции якоря, что и при нагрузке, и те же последовательные ампервитки. Ампервитки параллельной обмотки будут иметь при этом некоторое значение, пропорциональное i_e' . Устанавливая, далее, другие значения тока в последовательной

обмотке I_s , добиваемся каждый раз, путем изменения ампервитков обмотки шунтовой, равенства токов:

$$I_{ak} = I_s$$

и делаем отсчеты соответствующих значений i_e . В результате получаем кривую тока:

$$I_{ak} = I_s = f(i_e),$$

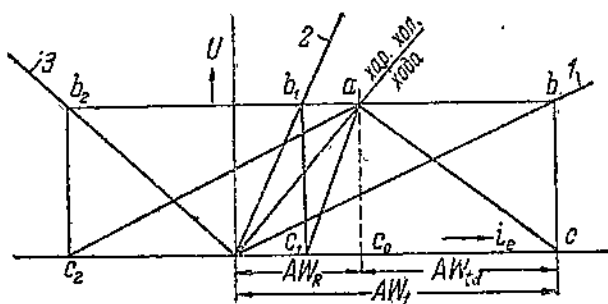


Рис. 166.

представляющую собой характеристику короткого замыкания компаунд-машины (кривые 2 и 3 рис. 166). На рис. 166 нанесены также кривая короткого замыкания I , снятая при отсутствии последовательной обмотки (т. е. при коротком замыкании машины, как генератора с одним лишь независимым возбуждением), и характеристика холостого хода. Для возможности нанесения всех характеристик на одной и той же диаграмме, характеристики короткого замыкания нанесены в масштабе вольт, т. е. получены путем умножения соответствующих токов на сопротивление R_a якоря и контакта щеток.

При наличии в машине одной лишь параллельной обмотки имеем, как известно, равенство:

$$AW_t = AW_{id} + AW_R,$$

где: AW_t — полные ампервитки шунтовой обмотки, AW_{id} — полные продольные ампервитки якоря, AW_R — полные ампервитки, необходимые для индуктирования в машине такой э. д. с., которая покроет падение напряжения от сопротивления R_a .

В случае появления в машине, кроме ампервитков параллельной обмотки, также ампервитков последовательной обмотки (AW_s), имеем:

$$AW_t + AW_s = AW_{id} + AW_R,$$

откуда видно, что для того же значения тока якоря I_{ak} , а следовательно, неизменных ампервитков $\Delta W_{id} + \Delta W_R$, ампервитки ΔW_s уменьшаются.

Имеем кривую 2 в виде характеристики короткого замыкания машины со смешанным возбуждением и реактивный треугольник машины ab_1c_1 . Как видно, треугольник повернут в сторону, обратную реактивному треугольнику машины с параллельным возбуждением. Ампервитки последовательной обмотки в данном случае столь сильно намагничивают машину, что перекрывают ампервитки реакции якоря и дают еще намагничивающую составляющую ab_1 . При меньшей величине ампервитков ΔW_s возможно, конечно, попадание точки b_1 между точками a и b , т. е. попрежнему размагничивание, но меньшее, чем в генераторе с параллельным возбуждением.

В случае весьма сильного действия ампервитков ΔW_s , что может иметь место в гиперкомпаундной машине, характеристика короткого замыкания расположится в области отрицательных значений токов i_a , т. е. придется дать параллельной обмотке возбуждение такого знака, при котором уменьшилось бы действие последовательной обмотки. Имеем в этом случае кривую 3 и реактивный треугольник ab_2c_2 . Возможно также превращение реактивного

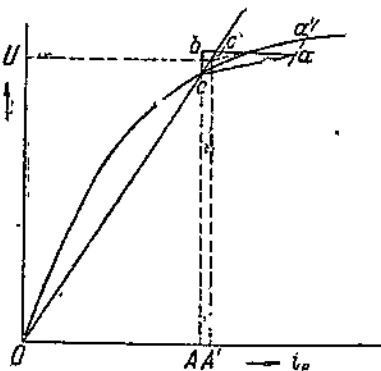


Рис. 167.

треугольника в прямую ac_0 , если:

$$\Delta W_{id} = \Delta W_s.$$

Имея реактивный треугольник, можно построить внешнюю характеристику (рис. 167).

Нанося на график (рис. 167) характеристику холостого хода, а также прямую падения напряжения в цепи шунта, проведенную в точку номинального напряжения (c), строим при этой точке реактивный треугольник abc . Затем перемещаем его параллельно самому себе так, чтобы точка c скользила по прямой падения напряжения. Точка a совместится тогда, при некотором положении треугольника, с характеристикой холостого хода (точка a'). Этому положению треугольника будет, очевидно, отвечать положение точки c' , фиксирующее напряжение $A'c'$ на зажимах машины при том значении тока якоря, для которого построен реактивный треугольник. Для определения напряжения при иных значениях тока делим гипотенузу треугольника на некоторое число частей, причем каждая часть будет соответствовать некоторому току нагрузки, выраженному в долях заданного тока основного треугольника. Перемещая каждый такой отрезок гипотенузы параллельно самому себе до совпадения с характеристикой холостого хода, получим положение его конца,

определяющее напряжение на зажимах машины. На рис. 168 дано такое построение, причем для ясности чертежа показана лишь верхняя часть рис. 167. Построение выполнено как для номинального тока I_N , так и для $I_{N/2}$. Прямая $a's'$ дает гипотенузу as реактивного треугольника, перенесенного в соответствующее положение. Половина стороны as , перенесенная параллельно самой себе, выражается отрезком $a_1'c_1'$. Точки c' и c_1' определяют напряжение на зажимах машины при полной (c') и половинной (c_1') нагрузке. Определив, кроме этих двух точек, также ряд промежуточных, можем построить внешнюю характеристику, отложив на напряжения, отвечающие этим токам, в функции соответ-

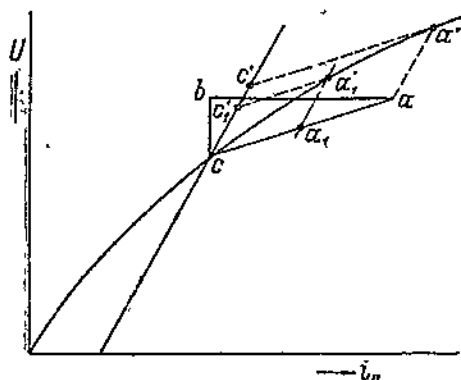


Рис. 168.

ствующих им значений тока (рис. 169).

Можно также снять регулировочную характеристику компаунд-машины; она будет отличаться от регулировочной характеристики шунтовой машины тем, что в пределах, промежуточных между холостым ходом и нормальной нагрузкой, ток возбуждения будет меньше, чем для холостого хода (рис. 170). Отметим, что регулировочная кривая имеет здесь малое практическое значение, так как напряжение и без подрегулирования сохраняет достаточное постоянство.

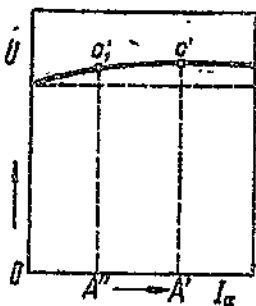


Рис. 169.

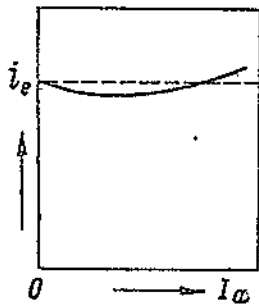


Рис. 170.

ГЛАВА VII.

ОСОВЫЕ СВОЙСТВА ГЕНЕРАТОРОВ.

1. Условия самовозбуждения.

Чтобы выявить до конца свойства генераторов с самовозбуждением, необходимо остановиться на условиях возникновения тока в цепи возбуждения более подробно, чем это было сделано при рассмотрении различных способов возбуждения машины. К таким условиям относятся:

1. Наличие остаточного поля в магнитной цепи машины, так

как первый толчок к возникновению тока должен быть создан э. д. с., вызванной этим полем.

2. Правильное соединение щеток с обмоткой возбуждения, чтобы поле было усилено появившимся в этой обмотке током.

3. Требование, чтобы сопротивление возбуждающего машину контура не превосходило некоторой критической величины.

Первое условие понятно без особых пояснений. Отметим только, что достаточная для самовозбуждения величина остаточного поля имеет место лишь в таких машинах, магнитная цепь которых состоит в значительной своей части из литой стали или чугуна. В турбогенераторах, где применяется легированное железо, величина остаточного поля мала и самовозбуждение не всегда обеспечено.

Относительно соединения щеток с обмоткой возбуждения нужно заметить, что соединение это должно быть вполне определенным в каждой машине, независимо от направления остаточного поля. В самом деле, задавая определенное направление линиям этого поля, предположим, что при замыкании якоря на обмотку возбуждения получается усиление магнитного потока. Если затем изменить, воздействием извне, направление остаточных линий, приключив, например, цепь возбуждения временно к аккумуляторной батарее, то по восстановлении прежнего соединения между якорем и щетками получится противоположная полярность щеток и обратное направление тока в обмотке возбуждения, что поведет опять к усилению поля. Таким образом машина самовозбуждается и в этом случае, если, конечно, направление вращения якоря сохранено неизменным. В случае изменения направления вращения надо поменять местами соединения между щетками и возбуждающей цепью, чтобы возбуждение машины стало опять возможным.

Требование величины сопротивления цепи возбуждения меньше критической может быть выяснено на основании рассмотрения характеристики холостого хода и прямой падения напряжения в цепи пунта. Как было показано выше, эта последняя прямая имеет уклон к оси абсцисс:

$$\operatorname{tg} \alpha = r_e$$

причем устойчивая точка на характеристике холостого хода получается при данном r_e там, где эта характеристика пересекается с прямой падения (рис. 171). Пусть изменяется r_e , а следовательно, и α . Тогда для каждого значения r_e получим свою прямую, причем до тех пор, пока будем иметь пересечение характеристики холостого хода и прямой падений, получение некоторого напряжения от машины будет возможно. Когда же дойдем до такого значения r_e , при котором прямая пойдет выше начальной части характеристики холостого хода, возбуждение пропадет, так как развиваемая машиной э. д. с. (определяемая характеристикой холостого хода) окажется меньше того напряжения, которое необходимо приложить к обмотке возбуждения

для получения в ней тока возбуждения, соответствующего этой э. д. с.

Положение прямой падения, касательное к начальной части характеристики холостого хода, определяет критический угол α_k и соответствующее ему критическое сопротивление r_c .

Заметим, что в случае принятия во внимание остаточной э. д. с. (рис. 172), точка пересечения характеристики холостого хода и рассматриваемой прямой получится всегда, но, поскольку начальная часть характеристики холостого хода имеет уклон меньше угла α_2 , отличный от основной прямолинейной части угла α , то, согласно рис. 172, имеем весьма малое увеличение

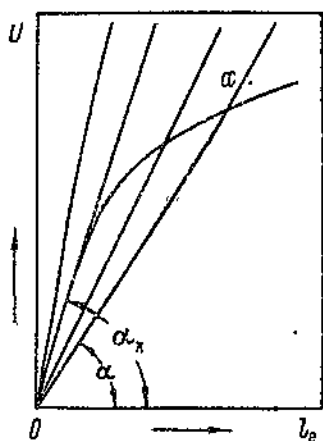


Рис. 171.

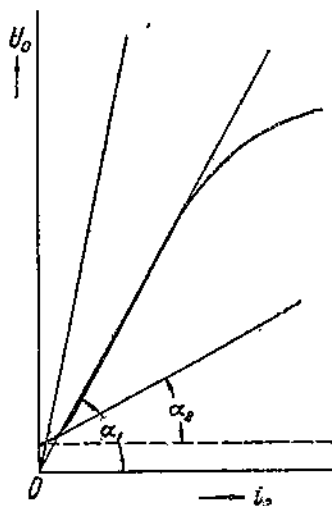


Рис. 172.

э. д. с. до тех пор, пока, постепенно уменьшая сопротивление, не дойдем до критической его величины.

В начальной стадии возбуждения машины ток возбуждения медленно нарастает еще и потому, что сопротивление переходного слоя щеток при малых токах весьма велико.

Все сказанное предполагает, конечно, постоянство скорости вращения якоря генератора. В случае увеличения скорости получится подъем характеристики холостого хода (кривые для двух скоростей нанесены на рис. 173) и возможность самовозбуждения при том сопротивлении, которое было критическим для меньшей скорости вращения (кривые a и b рис. 173). Хотя вышеизложенное относится непосредственно к генератору шунтового возбуждения, однако нетрудно распространить выводы и на машину с последовательным и смешанным возбуждением; необходимо только помнить, что для последовательной машины сопротивление внешней цепи играет ту же роль, что в машине шунтовой сопротивление регулирующего реостата в цепи возбуждения.

Для возбуждения последовательной машины необходимо уменьшать сопротивление той внешней цепи, на которую замкнут генератор. Делать это необходимо, однако, очень осторожно, так как вслед за возбуждением генератора значительно падает сопротивление его цепи вследствие уменьшения сопротивления контакта щеток при возникновении тока. Последнее ведет к еще большему нарастанию тока, весьма значительному еще и потому, что для создания достаточного тока в начале процесса приходится устанавливать величину внешнего сопротивления меньше его значения при нормальной работе, а вслед за самовозбуждением машины сразу увеличивать сопротивление внешней цепи.

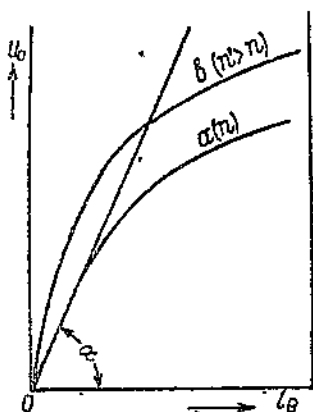


Рис. 173.

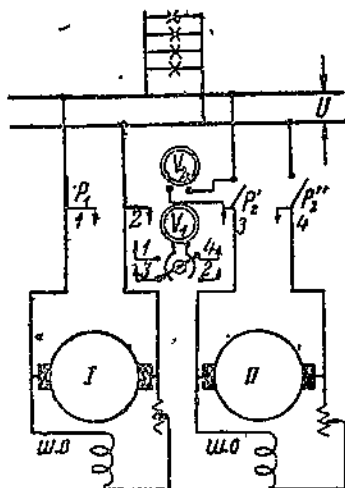


Рис. 174.

Что же касается машины смешанного возбуждения, то вследствие малого числа ампервитков последовательной обмотки процесс самовозбуждения идет в холостом ходу так же, как и в шунтовом генераторе.

2. Параллельная работа шунтовых генераторов.

Число машинных единиц, которыми снабжаются современные электрические станции, бывает обычно больше одной; два, три и более генераторов, будучи соединены в параллель, отдают совместно энергию во внешнюю сеть.

Условия включения генераторов в параллель, так же как и сама параллельная работа, имеют некоторые особенности, которые здесь и рассмотрим. Ввиду малого применения в практических условиях машин независимого возбуждения и еще более редкого включения их в параллель, мы разберем лишь случай совместной работы самовозбуждающихся генераторов, в частности шунтовых и смешанного возбуждения.

Обращаясь к шунтовым машинам, установим, прежде всего, условия параллельного их включения.

Предположим, что к шинам (рис. 174) посредством рубильника p_1 приключена шунтовая машина I и на шинах имеется напряжение U . Предположим также, что вследствие увеличения проводимости приемников ток первой машины, дойдя до номинального значения, будет возрастать и далее. При таких условиях, чтобы не перегрузить генератора, необходимо приключить к шинам вторую машину и взять на нее избыток мощности.

Для этого необходимо, развернув первичным двигателем генератор II , возбудить его до напряжения шин, а также убедиться в правильной его полярности. Первое можно сделать помощью общего для обоих генераторов вольтметра V_1 , снабженного переключателем для включения прибора на ту или другую машину. Проверка полярности может быть произведена помощью вольт-

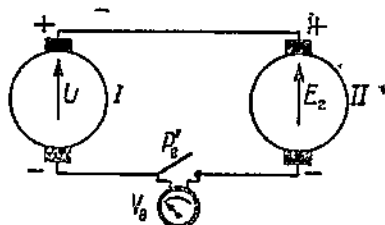


Рис. 175.

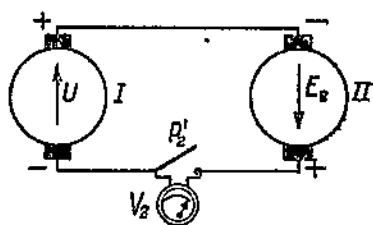


Рис. 176.

метра V_2 , включенного параллельно одному из однополюсных рубильников (p_2') второй машины. При замыкании другого однополюсного рубильника (p_2'') к вольтметру окажется приложенной алгебраическая сумма напряжений обеих машин. В случае правильной полярности вольтметр покажет нуль, так как напряжение шин U и э. д. с. E_2 машины II , будучи равными по величине, окажутся направленными навстречу друг другу (упрощенная схема рис. 175). При неправильной полярности получим показание вольтметра, равное сумме:

$$U + E_2 = 2U,$$

так как предположено: $U = E_2$. Схема цепи машин дана для этого случая на рис. 176. Как видно, здесь получается не параллельное, а последовательное соединение двух машин. Замкнув при такой полярности машина рубильник p_2 , мы получим короткое замыкание двух последовательно соединенных генераторов со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Ввиду того, что в замкнутой цепи двух генераторов имеем двойное значение э. д. с. при двойном, кроме того, сопротивлении якорей и контактов щеток, то ток короткого замыкания получается не большим, чем при коротком замыкании одной машины, однако все же настолько большим, что представляет несомненную опасность.

Проверка полярности может быть произведена и без вольтметра V_2 одним лишь прибором V_1 , если подвести к переключателю проводники от зажимов двух генераторов так, как показано на рис. 174. В этом случае при правильной полярности генераторов магнитоэлектрический вольтметр дает отклонение в одну и ту же сторону при включении его как на одну, так и на другую машину.

Проверив полярность тем или другим способом и удостоверившись еще раз в равенстве напряжений, включаем машины в параллель, замыкая рубильник p_2 .

Непосредственно после включения генератор II никакой нагрузки нести не будет, так как его э. д. с. равна напряжению шин. Чтобы заставить генератор взять на себя часть тока сети, необходимо усилить поле его, увеличив ток в цепи возбуждения. Ток I_{a2} в цепи машины мы получим за счет разности:

$$E_2 - U = I_{a2} R_{a2}. \quad (161)$$

Нагруженный этим током генератор замедлит несколько скорость вращения первичного двигателя; регулятор последнего придет в действие, подаст больше рабочего вещества (например, пара в паровой турбине или воды в гидравлическом двигателе), и прежняя скорость вращения восстановится при большей подведенной к валу генератора мощности.

Ввиду ответвления части тока во вторую машину первый генератор несколько разгрузится. Получится переход части нагрузки на вторую машину. Однако напряжение на шинах при таком переводе нагрузки несколько повысится, так как сопротивление двух параллельно включенных машин будет меньше, чем одной машины. Для приведения напряжения к прежнему значению необходимо уменьшить возбуждение первой машины, что будет сопровождаться дальнейшим перераспределением нагрузки. В результате, восстановив нормальное напряжение на шинах, получим ток в цепях обеих машин. Дальнейшим увеличением возбуждения второй машины и уменьшением его в первой можно взять всю нагрузку на машину II, оставив машину I без тока. Таким путем и производят практически перевод нагрузки с одной машины на другую.

Выясним теперь вопрос о том, как происходит распределение тока при изменении проводимости внешней цепи в случае параллельного включения ряда генераторов.

Для n параллельно включенных машин можно написать следующее равенство:

$$U = E_1 - \Delta e_1 = E_2 - \Delta e_2 = \dots = E_n - \Delta e_n, \quad (162)$$

где $E_1, E_2, \dots, E_n$ — э. д. с., индуктированные в машинах при холостом ходе и той же скорости вращения якорей, что и под нагрузкой, $\Delta e_1, \Delta e_2, \dots, \Delta e_n$ — падения напряжения в тех же машинах, обусловленные реакцией якоря, омическим падением, а также изменением поля вследствие изменения тока в цепи возбуждения, U — попрежнему напряжение на шинах.

Предполагая, что все машины были включены в параллель при отсоединенных приемниках и равенстве э. д. с., имеем:

$$E_1 = E_2 = \dots = E_n = E,$$

что дает на основании равенства (162):

$$\Delta e_1 = \Delta e_2 = \dots = \Delta e_n = \Delta e. \quad (163)$$

Обращаясь теперь к внешним характеристикам машин, снятым для каждой из них в отдельности при том же сопротивлении цепи шунта и той же скорости вращения, что и в условиях параллельной работы (рис. 177), можем установить, что условие (163) приводит к тем большей разнице в токах, отдаваемых машинами, чем больше разница в их внешних характеристиках. На рис. 177 по оси абсцисс отложены значения тока в процентах от номинального его значения для каждой из ма-

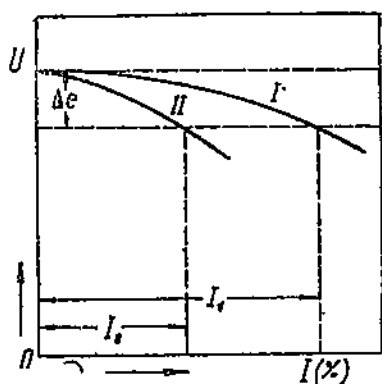


Рис. 177.

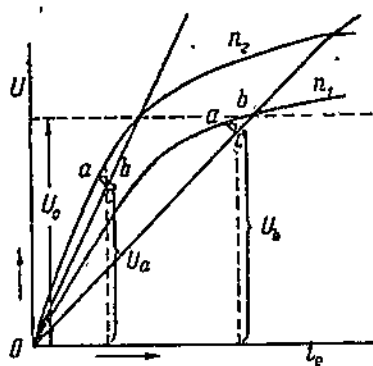


Рис. 178.

шин; это дает возможность сравнивать генераторы разной мощности. Как видим, одинаковое падение напряжения Δe получается у первой машины при весьма значительном токе I_1 , тогда как у второй, вследствие большего падения, напряжения при токе I_2 почти вдвое меньшем. При таких условиях нагрузка распределится неравномерно, и тот генератор, характеристика которого проходит выше, будет всегда загружаться сильнее. Поэтому желательно так видоизменить характеристику генераторов, чтобы они совпали, так как только в этом случае распределение токов получится пропорциональным мощности машин. Это может быть осуществлено путем изменения насыщения (если только характеристики не чрезмерно расходятся).

Обращаясь к характеристикам холостого хода генератора, снятым для различных скоростей вращения (рис. 178), видим, что при одном и том же напряжении при холостом ходе U_0 и неизменном реактивном треугольнике (a, b, c) напряжение в случае значительной скорости вращения машины ($n_2 > n_1$) имеет значение U_a , тогда как при меньшей скорости оно равно U_b ,

причем $U_b > U_a$. Отсюда очевидно, что, увеличивая скорость вращения и, соответственно, уменьшая ток в цепи возбуждения, мы снижаем внешнюю характеристику того генератора, у которого она проходила выше, и, наоборот, уменьшая скорость вращения и поднимая возбуждение, поднимаем внешнюю характеристику второго генератора до совпадения со сниженной кривой первой машины. Первичный двигатель допускает обычно некоторое изменение скорости путем соответствующей перестановки регулятора, ввиду чего при небольшом отклонении характеристик удастся добиться равномерного распределения нагрузок.

Неправильное распределение нагрузок может, конечно, получиться и в том случае, если регулятор одного из двигателей параллельно работающих генераторов изменяет скорость машины иначе, чем другие. Поэтому необходимо также правильно подобрать характеристики скорости двигателей. Практически, конечно, всегда возможно регулировать распределение нагрузок путем воздействия на токи возбуждения машин. Однако при быстро изменяющейся нагрузке это не всегда удастся, и поэтому желательно, чтобы генераторы автоматически распределяли между собой нагрузку пропорционально мощности.

3. Параллельная работа компаундных генераторов.

Схема параллельного включения компаундных машин дана на рис. 179. Так как включение машин на параллельную работу и сама работа их при параллельном соединении имеют некоторые особенности, то рассмотрим этот случай отдельно.

Предполагая попрежнему, что одна из машин (I) работает, будучи нагружена до некоторого значения тока, включим вторую машину (II) с целью принять на нее также некоторую нагрузку. Не обращая пока внимания на провод aa , соединяющий одноименные щетки машины, произведем включение так же, как для машин шунтовых, т. е., подняв скорость машины II до номинальной, проверим полярность и, уравнив напряжение шин и включаемой машины, замкнем рубильник p_2 . В первый момент после включения машина II никакой нагрузки на себя не возьмет. Так будет продолжаться до тех пор, пока мы не начнем увеличивать ток в цепи возбуждения ее шунтовой обмотки. При небольшом увеличении этого тока генератор возьмет на себя некоторую нагрузку, которая будет затем расти, несмотря на прекращение увеличения тока в цепи шунта. Произойдет

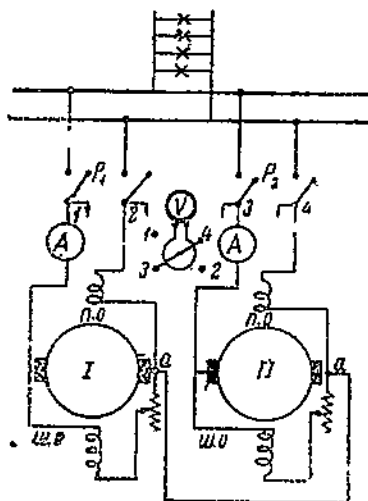


Рис. 179.

это потому, что последовательная обмотка будет своими ампер-витками увеличивать поле машины и ее э. д. с., что поведет к дальнейшему увеличению тока.

В случае одинаковых внешних характеристик обеих машин (например, подобных кривой 1 рис. 180), нарастанию э. д. с. приключенной машины и увеличению напряжения на ее зажимах будет соответствовать определенное увеличение напряжения на зажимах уже работающей машины ввиду сброса ею части нагрузки. В результате при одинаковом уклоне характеристики по обе стороны от точки перегиба (точка *b*) получим вполне устойчивую работу системы. Положение изменится, если характеристика приключаемой машины изобразится кривой 2 рис. 180. В этом случае при нарастании э. д. с. напряжение на зажимах машины II будет больше возможного напряжения

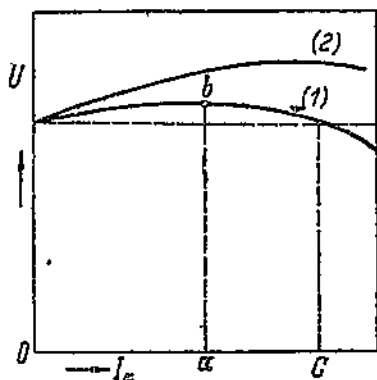


Рис. 180.

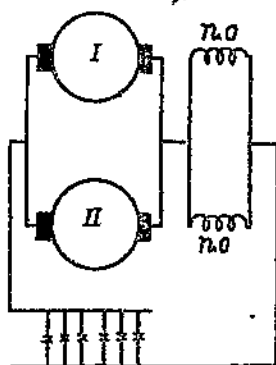


Рис. 181.

машины I во всем диапазоне допустимых значений тока, и генератор II возьмет на себя всю нагрузку полностью, разгрузив машину I. Этим, однако, дело не ограничится, так как напряжение на зажимах первой машины будет и после полной ее разгрузки меньше напряжения второй машины. Ток в цепи первого генератора изменит направление, вследствие чего машина эта пойдет двигателем. Изменение направления тока в цепи ее повлечет за собой уменьшение возбуждения, так как обратный направленный ток последовательной обмотки будет теперь уменьшать поле шунтовой. Это вызовет увеличение скорости якоря машины (вследствие стремления последнего развить при уменьшенном потоке требуемую для равновесия э. д. с.), так как регулятор первичного двигателя, стремясь удерживать постоянство скорости вращения генератора, закроет в момент полной разгрузки генератора полностью подачу рабочего вещества. В дальнейшем первичный двигатель вследствие своей необратимости никак на изменение скорости генератора реагировать не будет. Получится полное расстройство работы системы и разнос первого генератора.

Дело совершенно изменится, если применить так называемый уравнительный провод (аа-рис. 179), соединив им те одноименные щетки, к которым приключены последовательные обмотки возбуждения. В случае выбора сопротивления этого провода весьма малым, схему рис. 179 можно представить наглядно так, как это сделано на рис. 181 (шунтовые обмотки здесь не показаны). Как видно, обе последовательные обмотки включены в таком случае параллельно, причем общий ток машин распределяется между ними лишь в зависимости от их сопротивлений. При увеличении шунтового возбуждения одного из генераторов и возрастании его тока получится изменение тока в цепи якоря другого генератора, но токи в цепи последовательных обмоток останутся в прежнем соотношении, ввиду чего опасность перебрасывания всей нагрузки и разнота одной из машин отпадает. Уравнительный провод является, поэтому, необходимой частью схемы параллельного включения машин смешанного возбуждения. Отметим, что уравнительным проводом должны быть всегда соединены те две одноименные щетки, к которым приключены последовательные обмотки возбуждения. Проводом этим машины должны быть наглухо соединены между собой; никаких рубильников и предохранителей ставить на нем не следует.

Наличие уравнительного провода сообщает условиям параллельного включения машин некоторые особенности. При включении машины к другой, уже работающей, можно поступать двояко.

Первый способ включения состоит в том, что, подрегулировав напряжение подключаемой машины до величины напряжения шин и убедившись в правильной полярности, включают сразу оба ножа рубильника p_2 (рис. 179). После включения э. д. с. подключаемой машины сразу возрастает, так как по последовательной обмотке ее пойдет ток, посланный уже подключенной машиной через уравнительный провод. Ввиду этого генератор толчком возьмет на себя некоторую нагрузку. Такой толчок, конечно, нежелателен для всей механической конструкции электрической машины и первичного двигателя, но особой опасности не представляет. Преимуществом этого способа пуска является малое изменение напряжения на шинах после подключения второй машины.

Избежать толчка нагрузки можно следующим образом. Замыкают сперва при подключении второго генератора лишь тот нож рубильника p_1 , который соединен с последовательной обмоткой данной машины. В этом случае еще до окончательного подключения к шинам получим в цепи последовательной обмотки подключаемой машины тот ток, который там будет и после полного ее включения. Подрегулировав затем шунтовое возбуждение так, чтобы уравнивать напряжение шин и генератора, включаем второй нож. После этого машина никакой нагрузки на себя не берет, будучи заранее подготовлена к включению. Чтобы заставить второй генератор отдать некоторый ток, необходимо увеличить шунтовое возбуждение.

Недостатком такого способа включения является падение напряжения на шинах непосредственно после включения первого ножа рубильника p_2 , так как вследствие ответвления части тока последовательной обмотки работающей машины получается ослабление ее поля и уменьшение э. д. с. Лишь после подрегулировки возбуждения реостатом в цепи шунта можно восстановить прежнее напряжение на шинах. Ввиду этого применение данного способа включения нежелательно при питании генераторами осветительных сетей, весьма чувствительных, как известно, к изменениям напряжения. В трамвайных же сетях этот способ следует предпочесть, так как он не сопровождается толчком нагрузки.

В отношении распределения нагрузок на параллельно работающие компаунд-машины можно сказать то же, что было сказано выше относительно шунтовых машин.

4. Включение генератора на трехпроводную сеть.

Трехпроводная сеть постоянного тока представляет то значительное удобство, что дает возможность располагать одновременно двумя напряжениями, находящимися в отношении 2:1. Необходимость в таких напряжениях может встретиться, на-

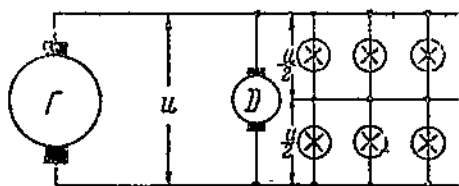


Рис. 182.

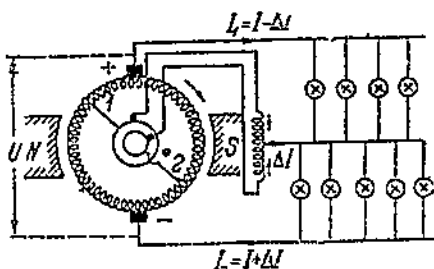


Рис. 183.

пример, тогда, когда значительная протяженность силовой сети требует повышенного значения напряжения, между тем как осветительная сеть позволяет применить более низкое напряжение (например, для силовой сети 440 V, а для осветительной 220 V). Схема питания такой сети в ее теоретическом выполнении представлена на рис. 182.

Лампы накаливания, показанные крестиками, включены здесь между средним проводом и двумя крайними проводами. Электродвигатели включены между крайними проводами.

Легко видеть, что эта схема явно неудовлетворительна. Действительно, в случае неравенства сопротивлений ламп, включенных в оба плеча сети, напряжение перераспределится таким образом, что к плечу большего сопротивления окажется приложенным большее напряжение, а это поведет к перегоранию ламп и их перегоранию.

Очевидно, что необходимо иметь схему, где автоматически

происходит выравнивание напряжений обоих плеч сети. Такая схема была предложена Доливо-Добровольским в 1894 г.

Машина постоянного тока обычного типа (шунтовая или со смешанным возбуждением) выполняется с двумя контактными кольцами, присоединенными к точкам обмотки, сдвинутым на 180° электрических (в случае двухполюсной машины, очевидно, к двум диаметрально точкам). На рис. 183 дана схема такой машины и ее включение в трехпроводную сеть. Контактные кольца замыкаются при помощи щеток на катушку самоиндукции, выполненную с железным сердечником. Средняя точка катушки соединяется со средним проводом трехпроводной системы, называемым часто нулевым, тогда как крайние провода соединяются со щетками коллектора.

Рассматривая генератор, присоединенный при помощи колец к катушке самоиндукции, видим, что по существу он представляет собой машину переменного тока, замкнутую на значительное реактивное сопротивление. Ввиду этого переменный ток, посылаемый машиной в катушку, весьма незначителен.

Кроме переменного тока, обусловленного переменным напряжением колец, в катушке будет протекать постоянный ток. Это будет в том случае, когда сопротивления плеч трехпроводной системы неодинаковы, так как тогда между этим проводом и средней точкой машины (в данном случае — средней точкой катушки) будет иметь место разность потенциалов. В самом деле, изображая разность потенциалов между щетками коллектора (U), расстоянием между прямыми (+) и (-) (рис. 184), будем иметь кривые разности потенциалов между точками 1 и 2, к которым присоединены кольца в виде синусоид (в первом приближении), обозначенных теми же цифрами 1 и 2. Для любого момента времени получим значение соответствующих напряжений в виде ординат U_{+1} , U_{-1} , U_{+2} и U_{-2} , обозначенных нами на рис. 184 для некоторого положения якоря и момента времени t . Это последнее отсчитываем от момента, когда якорь занимает такое положение, что точки 1 и 2 проходят — первая под отрицательной щеткой и вторая под положительной.

Потенциалы концов катушки самоиндукции будут тогда меняться так же, как точек обмотки 1 и 2, и разность потенциалов на концах катушки изобразится для некоторого момента времени t' ординатой U_{12} (рис. 184). Потенциал средней точки катушки определится для этого момента серединой отрезка U_{12} . Для

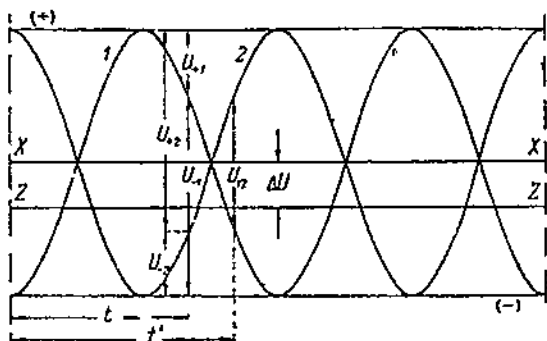


Рис. 184.

любого другого момента получим потенциал этой точки на прямой XX, делящей разность ординат кривых 1 и 2 пополам. Эта же прямая XX будет расположена посередине между прямыми (+) и (—), определяющими потенциал щеток.

Итак, если пренебречь падением напряжения, то во всех случаях мы будем иметь в середине катушки самоиндукции — делителя Доливо-Добровольского — средний потенциал по отношению к разности потенциалов щеток.

С другой стороны, распределение потенциала во внешнем контуре между двумя его плечами, лежащими одно от положительного зажима машины до нулевого провода и другое от нулевого провода до отрицательного зажима машины, зависит всецело от сопротивления плеч. При отсутствии соединения нулевого провода со средней точкой катушки, будем иметь в некотором частном случае прямую ZZ, определяющую потенциал нулевого провода. Между нулевым проводом и средней точкой катушки получится разность потенциалов ΔU , которая, в случае присоединения провода к катушке, вызовет ток от катушки (имеющей в данном случае высший потенциал) к нулевому проводу. Ток этот будет разветвляться в катушке и замыкаться через обмотку машины и линейные крайние провода. Путь уравнительного тока ΔI показан на рис. 183.

До включения нулевого провода на среднюю точку катушки мы имели:

$$I(r_0 + r_u) = U, \quad (164)$$

где: I — общий ток, отдаваемый машиной сети, r_0 и r_u — сопротивления верхнего и нижнего плеч сети. Падение напряжения в верхней части:

$$U_1 = Ir_0$$

и в нижней:

$$U_2 = Ir_u$$

Разность потенциалов между нулевым проводом и средней точкой катушки:

$$\Delta U = \frac{U}{2} - Ir_u$$

а также:

$$\Delta U = Ir_0 - \frac{U}{2},$$

откуда:

$$\Delta U = \frac{I(r_0 + r_u)}{2}. \quad (165)$$

Эта разность потенциалов, в случае пренебрежения сопротивлением катушки и якоря машины, должна пойти на покрытие падения напряжения от уравнительных токов в верхнем и нижнем плечах сети. Имеем тогда напряжение на верхнем плече:

$$U_1 = Ir_0 - \Delta U.$$

так как уравнивающий ток направлен здесь, очевидно, против тока I (рис. 184).

Для нижнего плеча получим:

$$U_2 = Ir_u + \Delta U$$

вследствие согласного направления уравнивающего тока. Подставляя в последние равенства значение ΔU из (165), имеем:

$$U_1 = Ir_0 - I \frac{r_0 - r_u}{2} = \frac{Ir_0 + Ir_u}{2};$$

$$U_2 = Ir_u + I \frac{r_0 - r_u}{2} = \frac{Ir_0 + Ir_u}{2}.$$

Отсюда:

$$U_1 = U_2 \quad (166)$$

и суммарное напряжение:

$$U = U_1 + U_2 = I(r_0 + r_u),$$

как того и следовало ожидать на основании равенства (164).

Как видно на основании равенства (166), напряжения плеч уравнились. Последнее равенство получено, однако, в предположении, что сопротивления катушки, машины и питательных проводов весьма малы. Практически имеем всегда некоторую асимметрию напряжений, зависящую, главным образом, от сопротивления катушки и проводов. Падение напряжения от уравнивающего тока в катушке бывает порядка 10% от U .

Кроме делителя Доливо-Добровольского, существуют и другие схемы деления напряжения. Все схемы, за исключением рассмотренной, имеют, однако, малое практическое значение.

ГЛАВА VIII.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТИПЫ ГЕНЕРАТОРОВ.

1. Машина Кремера для электрической сварки.

Электрическая сварка помощью вольтовой дуги получила за последнее время весьма широкое применение не только при исправлении сломанных металлических частей, но и при изготовлении новых. Благодаря усовершенствованию систем электрической сварки появилась возможность облегчить конструкцию многих частей, заменив тяжелые отливки легкими сварными частями.

Условия спокойного горения вольтовой дуги, получающейся между свариваемыми частями, требуют вполне определенного режима питания этой дуги, ввиду чего приходится применять генераторы с особыми характеристиками. Сюда относится, в первую очередь, машина Кремера.

Машина Кремера является, по существу, шунтовым генератором, в котором устроена добавочная обмотка возбуждения (e_2), питаемая от независимого источника тока (схема рис. 185).

Падение напряжения в вольтовой дуге, получающейся между электродом ε и свариваемой поверхностью c , меняется весьма сильно с изменением дугового промежутка. Ввиду этого необходима такая характеристика источника питания, чтобы ток в дуге оставался неизменным при широких колебаниях напряжения.

Шунтовой генератор обычного типа имеет внешнюю характеристику согласно рис. 185 (кривая a), причем работа на нижней неустойчивой ветви кривой невозможна; кроме того, с изменением напряжения на зажимах сила тока резко изменяется. Чтобы придать характеристике вид, соответствующий условиям сварки, устроена обмотка независимого возбуждения. В этом случае

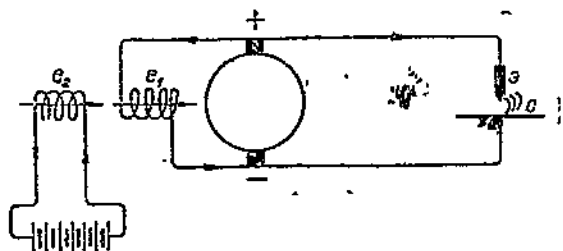


Рис. 185.

в машине будет существовать поле даже при коротком замыкании ее внешних зажимов, и характеристика $U=f(I_a)$ будет иметь вид кривой b рис. 186. При работе на нижней ее части имеем в широких пределах $I_a = \text{const}$.

Для выяснения возможности придания внешней характеристике вида рис. 186 произведем ее построение (рис. 187) помощью характеристики холостого хода, реактивного треуголь-

ника и прямой сопротивления цепи шунта. Разница от построения той же характеристики при чисто шунтовом возбуждении будет в том, что здесь имеются добавочные ампервитки независимой обмотки возбуждения. Откладывая эти ампервитки (в масштабе тока возбуждения шунтовой обмотки) по оси абсцисс (ток i_n), необходимо найти то изменение ампервитков шунтовой обмотки, которое будет иметь место при изменении напряжения на зажимах машины.

Имеем прямую линию AB , проведенную под углом α к оси абсцисс так, что $\text{tg } \alpha = r_e$. Абсцисса каждой точки этой прямой будет давать значение суммарных ампервитков возбуждения машины $i_n + i_e$, где i_e — ток шунтовой обмотки. Точка пересечения данной прямой с характеристикой холостого хода определит напряжение машины в холостом ходу при данном значении сопротивления r_e . Имея реактивный треугольник машины (a', b', c'), для некоторого известного значения тока I_a , можно, путем встраивания этого треугольника между характеристикой холостого хода и прямой сопротивлений, определить напряжение машины при нагрузке током I_a . Передвигая затем треугольник

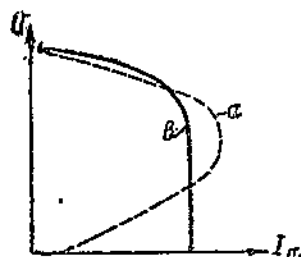


Рис. 186.

сильно насыщены. Части их, кроме того, выдвигаются и это дает возможность менять в широких пределах сопротивление магнитной цепи, а следовательно, и поток полюсов при тех же ампервитках возбуждения. Обмотка возбуждения включена последовательно в цепь щеток B_1 и B_2 и замкнута на внешнюю цепь (металл и электрод).

Рассматривая работу машины, предположим сначала, что возбуждение полюсов получают от независимого источника, а затем уже установим возможность самовозбуждения. Подвижные сердечники полюсов будем также предполагать первоначально вдвинутыми и укрепленными в неизменном положении.

Возбудив машину, приведем ее во вращение с некоторой скоростью. При вращении якоря в потоке Φ_1 обмотки возбуждения полюсов в нем индуктируется электродвижущая сила E_1 , которая будет иметь наибольшее значение между щетками b_1 и b_2 ; эта э. д. с. создает в параллельных ветвях якоря, а также короткозамыкающем проводе, ток I_1 . Этот ток, будучи весьма значительным, вследствие малого сопротивления якоря и соединительного провода, создаст, обтекая витки якоря, магнитное поперечное поле Φ_2 .

Ввиду сильно развитых полюсных паконечников проводимость в направлении, поперечном оси главных полюсов; будет хорошая, и само поле велико. Благодаря появлению этого поля в якоре будет индуктироваться вторая электродвижущая сила E_2 , которая будет иметь наибольшее значение между щетками B_1 и B_2 . При замыкании этих щеток на внешнюю цепь получим ток I_2 , определяемый этой э. д. с. и сопротивлением внешней цепи. Установим теперь приблизительно зависимость этого тока от напряжения машины при постоянной скорости вращения якоря.

Предполагая первоначально щетки B_1 и B_2 разомкнутыми, имеем между ними при вращении якоря некоторое напряжение. При замыкании внешней цепи увеличивается ток в якоре и его размагничивающее действие, направленное по оси полюсов, вследствие чего общие ампервитки возбуждения уменьшаются. Ввиду относительно небольшой величины ампервитков возбуждения полюсов, обусловленной необходимостью держать в допустимых пределах ток I_1 , получается быстрый перевес ампервитков якоря и почти полное размагничивание машины при коротком замыкании щеток B_1 и B_2 .

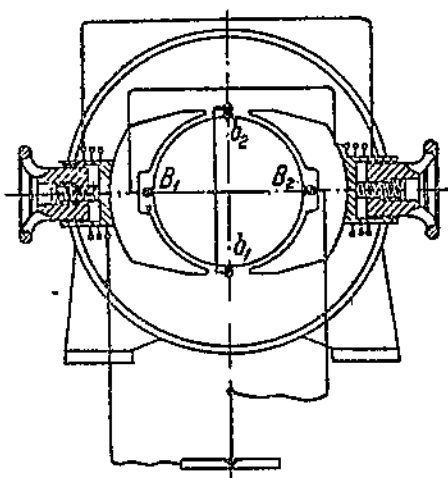


Рис. 188.

Разница в поведении данной машины с независимым возбуждением и машины Кремера будет в том, что, несмотря на одно только независимое возбуждение, в машине Розенберга получается более резкое изменение напряжения с нагрузкой. Ампервитки возбуждения машины Розенберга невелики. Благодаря наличию щеток и замыкающего их провода здесь получается как бы значительное усиление возбуждения и поля, влияющего уже непосредственно на напряжение рабочих щеток B_1 и B_2 . Реактивное же обратное действие рабочей цепи, весьма значительное благодаря большим ее ампервиткам, направлено без какой-либо передаточной инстанции встречно к малым ампервиткам независимого возбуждения. Отсюда — резкое влияние ампервитков якоря на напряжение машины.

Получение от сварочной машины Розенберга постоянной силы тока при слишком резком падении напряжения, при независимом возбуждении затруднительно. Можно включить обмотки возбуждения последовательно со щетками B_1 , B_2 , а не независимо. В этом случае ампервитки возбуждения, возрастая с увеличением тока, частично компенсируют действие ампервитков якоря, в результате чего получится весьма удовлетворительная внешняя характеристика машины.

Вид этой характеристики можно менять путем изменения магнитного сопротивления цепи главных полюсов. Если выдвинуть полюсные сердечники, то магнитное сопротивление для потока полюсов значительно увеличится, вследствие насыщения магнитной цепи при малом сечении перехода из полюсов в ярмо. Рассеяние потока полюсов между ними и ярмом значительно возрастет. Поток якоря останется, однако, почти без изменения, так как он частично замкнется через воздух от одного концевика к другому.

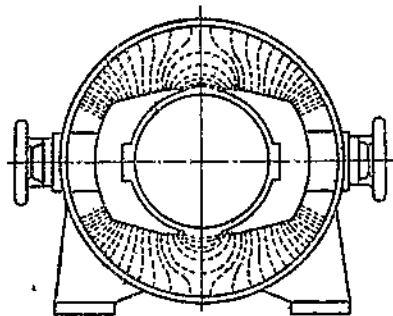


Рис. 189.

На рис. 189 дано распределение поля рассеяния полюсов машины Розенберга при выдвинутых сердечниках. Устанавливая эти сердечники различным образом, можно получить характеристики генератора Розенберга согласно рис. 190. Как видно из этого рисунка, регулировку можно вести в широких пределах и притом весьма простым способом.

Обратимся теперь опять к схеме независимого возбуждения этой машины (рис. 191) при отсутствии подвижных сердечников и заставим ее работать в условиях, далеких от режима короткого замыкания, в противоположность тому, что имело место при сварке. Другими словами, замкнем щетки B_1 и B_2 на некоторое постоянное сопротивление, рассчитав машину так, чтобы при данном значении тока еще не получалось зна-

чительного падения напряжения. После этого начнем изменять скорость вращения якоря n .

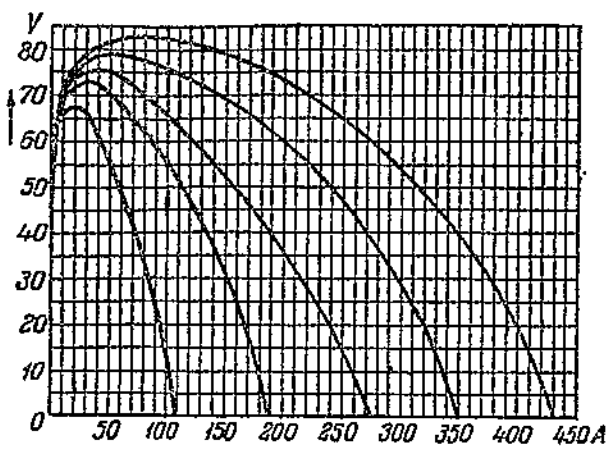


Рис. 190.

Магнитный поток возбуждения главных полюсов Φ_1 будет индуцировать электродвижущую силу E_1 , причем:

$$E_1 = \Phi_1 n. \quad (167)$$

Ток в проводе, замыкающем накоротко щетки $b_1 b_2$, будет:

$$I_1 = E_1 = \Phi_1 n, \quad (168)$$

и поле, создаваемое им в поперечной оси:

$$\Phi_2 = I_1 = \Phi_1 n. \quad (169)$$

Напряжение на щетках B_1, B_2 окажется:

$$E_2 = \Phi_2 n = \Phi_1 n^2. \quad (170)$$

При замыкании внешней цепи электродвижущая сила E_2 создает ток I_2 , который своими ампервитками будет стремиться уничтожить поток Φ_1 ; этот последний будет теперь определяться разностью ампервитков полюсов AW_1 и якоря $C_a I_2$.

$$\Phi_1 = AW_1 - C_a I_2, \quad (171)$$

где C_a — коэффициент, учитывающий как витки якоря, так и иное распределение поля якоря по сравнению с полем полюсов.

Подставляя значение Φ_1 в (170), имеем:

$$E_2 = (AW_1 - C_a I_2) n^2. \quad (172)$$

Ток внешней цепи при постоянном ее сопротивлении будет:

$$I_2 = \frac{E_2}{R}. \quad (173)$$

Подставляя сюда значение E_2 из (172), имеем:

$$I_2 = \frac{C_1}{R} (AW_1 - C_a I_2) n^2, \quad (174)$$

где C_1 — коэффициент пропорциональности.

Решая последнее выражение относительно I_2 , имеем окончательно:

$$I_2 = \frac{\frac{C_1}{R} AW_1}{1 + \frac{C_1 C_a}{R} n^2}; \quad (175)$$

здесь принято $C_{1a} = C_1 \cdot C_a$.

Таким образом ток во внешней цепи машины Розенберга зависит при постоянном сопротивлении внешней цепи от скорости вращения. При этом чем больше n , тем меньшие значения тока получим при изменении скорости. При $n = \infty$ имеем:

$$I_{2(n=\infty)} = \frac{AW_1}{C_a}. \quad (176)$$

Принимая треугольное распределение якорного поля, можно положить:

$$C_a = \frac{1}{2} (2 - \alpha_1) w_a,$$

где: $\alpha_1 = \frac{b^1}{c}$ — коэффициент полюсной дуги, $w_a = \frac{N}{2 \cdot 2a}$ — число витков параллельной ветви якоря.

Подставляя в (176) значение C_a , имеем:

$$I_{2(n=\infty)} = \frac{2AW_1}{(2 - \alpha_1)w_a}. \quad (177)$$

Итак, при возрастании скорости ток, отдаваемый машиной во внешнюю цепь, стремится асимптотически к постоянному значению, определяемому ур-нием (177).

На рис. 192 дана кривая изменения тока в функции скорости $I_2 = f(n)$. Как видно, начиная от некоторой точки, ток получает почти постоянное значение. Последнее может быть использовано в том случае, если применить машину Розенберга для освещения поездов. Приводя генератор во вращение от оси вагона, получаем резкое изменение скорости. Если же включить машину Розенберга в параллель с аккумуляторной батареей, доставляющей в то же время ток в цепь ее возбуждения, то можно сделать так, что при скоростях хода поезда, меньших той, при которой получается достаточное постоянство тока,

работать на сеть будет батарея. По переходе определенной скорости включается в параллель к ней генератор Розенберга, который берет на себя как зарядку батареи, так и питание осветительной сети. При всех дальнейших изменениях скорости значение тока, отдаваемого машиной, почти не изменяется.

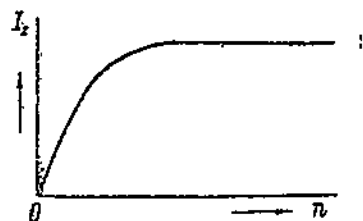


Рис. 192.

Отметим, что изменение направления вращения генератора не сказывается на полярности щеток B_1, B_2 , так как в связи с изменением направления электродвижущей силы E , меняется ток I_1 , а следовательно, и направление потока Φ_2 . Электродвижущая сила сохраняет свой знак, так как изменяется направление и поля и вращения якоря. Последнее весьма важно для возможности параллельной работы с аккумуляторной батареей при обратном направлении движения поезда.

3. Машина ГЕО для электрической сварки.

Вторым типом самовозбуждающегося генератора для электрической сварки является машина ГЕО, выполняемая в СССР заводом „Электрик“. Машина имеет четыре полюсные выступа. Каждый два выступа образуют один расщепленный полюс (рис. 193). Два выступа, принадлежащие к различным полюсам N_n и S_n , выполнены с малым сечением сердечника и сильно насыщаются; два других выступа N_g и S_g не насыщены.

На коллектор машины наложены три щетки. Две из них, главные (α и ϵ), как обычно, располагаются в нейтральной зоне; третья, вспомогательная (z), стоит между выступами одинаковой полярности (например N_g и N_n ; размещение щеток указано применительно к кольцевому якорю). Обмотка возбуждения полюсов включается между вспомогательной щеткой и одной из главных щеток. При этом все полюсы могут быть соединены последовательно или же, как то показано на рис. 193, в две параллельные группы, из которых в одну входят насыщенные выступы N_n и S_n , а в другую — ненасыщенные N_g и S_g . Реостаты r_1 и r_2 служат для регулирования тока в цепях возбуждения.

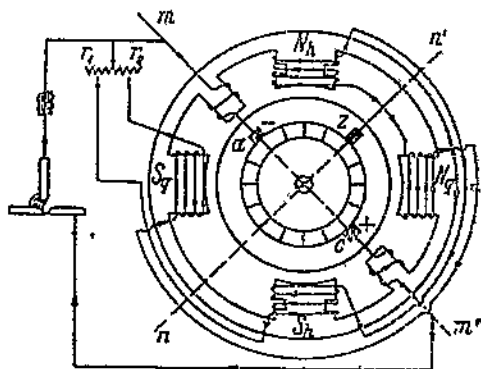


Рис. 193.

В машине устроены так же, как обычно, дополнительные полюсы. Их отличие от дополнительных полюсов нормальной

машины постоянного тока заключается лишь в большой ширине наконечника. Последнее необходимо для обеспечения удовлетворительной коммутации во всех положениях главных щеток. Щетки выполняются подвижными в небольших пределах, так как это дает возможность регулировать силу тока, отдаваемого машиной.

Своеобразие схемы ГЕО заключается в использовании реакции якоря для получения реакто изменяющейся внешней характеристики, необходимой для хорошей работы машины в условиях электрической сварки. Для выяснения влияния реакции якоря разобьем обмотку якоря на четыре квадранта осями mn' и $m'n'$. Части обмотки, заключенные в углах mon' и $m'on$, действуют своими ампервитками на поперечные полюса N_q и S_q , сильно размагничивая их. Части обмотки, расположенные в углах pot и $p'ot'$, подмагничивают основные полюса S_h и N_h в небольшой, впрочем, степени, так как сердечники этих полюсов сильно насыщены. В результате реакто изменения поперечного потока, э. д. с. в части обмотки, расположенной между главной щеткой c и вспомогательной z , также сильно изменяется при изменении тока. Возможно даже изменение знака результирующего потока, действующего в поперечной оси, и, как следствие, изменение знака э. д. с. Наоборот, э. д. с., индуцированная в части обмотки, лежащей между щетками a и z , находится под воздействием основных полюсов N_h и S_h и меняется весьма мало. Результирующая э. д. с., индуцированная в частях обмотки, расположенных между главными щетками a и c , меняется значительно за счет изменения первой ее составляющей, индуцированной поперечным потоком. Напряжение машины получает резкую зависимость от тока, отдаваемого машиной во внешнюю цепь. В результате имеем внешние характеристики машины, изображенные на рис. 194. Каждой характеристике отвечает свое положение главных щеток. Смещая их, меняем воздействие поля реакции якоря на магнитную систему машины и, как следствие, характеристики машины.

В последнее время фирмой ГЕО предложена более совершенная схема сварочной машины, отличающаяся от рассмотренной тем, что регулирование тока достигается при помощи последовательной обмотки, расположенной на поперечных полюсах N_q и S_q совместно с шунтовой обмоткой. Последовательная обмотка включается в цепь главных щеток таким образом, что ампервитки ее направлены встречно к ампервиткам шунтовой. Регулирование ампервитков последовательной обмотки достигается помощью изменения числа ее витков, что практически осуществляется помощью устройства ответвлений.

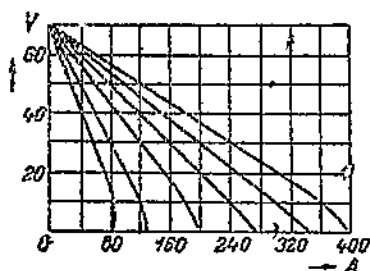


Рис. 194.

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

1. Обратимость электрических машин.

Для выяснения условий работы машины постоянного тока в двигательном режиме будем исходить из рассмотрения перехода нормально работающей шунтовой машины из генераторного режима работы в двигательный. Выполнив все то, что полагается для параллельного включения машин согласно схеме рис. 174, предположим, что вместо увеличения тока в цепи возбуждения приключенной машины мы будем его уменьшать. Электродвижущая сила, индуктированная в якоре, станет тогда меньше напряжения шин, в результате чего за счет разности

$$U - E_2 = I_{a2} R_{a2} \quad (178)$$

получим ток I_{a2} . Направление этого тока будет противоположно тому, который имел место при нагрузке машины как генератора, что могло быть осуществлено путем увеличения возбуждающего тока. Ток идет теперь в направлении напряжения шин, т. е. поступает из сети в машину, тогда как ранее он шел в направлении э. д. с. машины — в сеть, согласно уравнению (161). В соответствии с изменением направления тока в якоре получим изменение направления механической силы, приложенной к проводникам якоря со стороны оставшегося неизменным магнитного поля.

В результате изменения направления момента электромагнитных сил не получится уже противодействия моменту механического двигателя. Машина будет стремиться сама вращаться в прежнем направлении, не требуя от сочлененного с нею механического двигателя энергии, так как будет получать ее из сети.

Итак, при переходе из генераторного в двигательный режим, направление вращения шунтовой машины остается неизменным, если магнитный поток сохраняет свое направление. Для этого перехода достаточно изменить ток возбуждения машины в сторону его уменьшения.

Генераторный режим работы машины получается в том случае, когда э. д. с., индуктируемая в якоре, больше напряжения шин; двигательный режим — когда она меньше.

Такой перевод машины из одного режима в другой практически применяется, например, в схеме регулирования по Леонардо, изложенной в дальнейшем. Для иллюстрации на рис. 195 дана схема двух шунтовых машин, включенных параллельно, из которых одна работает в двигательном, другая в генераторном режиме. Предположено, что обмотки якоря и возбуждения намотаны в одну и ту же сторону. Направление токов в якоре и возбуждении шунтовой обмотки, а также направление вращения показаны стрелками.

Для последовательной машины вопрос о переходе из генераторного в двигательный режим может быть рассмотрен подобным же образом, хотя здесь дело обстоит несколько сложнее.

Предположим, что последовательная машина (рис. 196), развернутая предварительно до номинальной скорости, приключается к сети, находящейся под некоторым напряжением U . Так как машина не может быть возбуждена заранее, то остается включить ее в сеть без предварительной проверки. Отметим, что практически производить такое включение ни в коем случае нельзя, и мы приводим его здесь лишь для выяснения особенностей последовательной схемы.

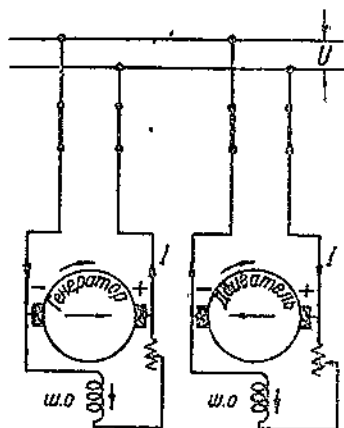


Рис. 195.

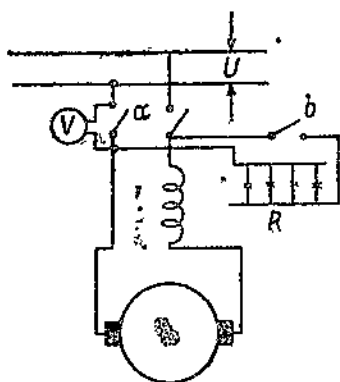


Рис. 196.

Немедленно вслед за включением в цепи машины получается весьма большой ток, созданный напряжением U ; ток этот, проходя по последовательной возбуждающей обмотке, создает свое магнитное поле. В результате в обмотке якоря появляется э. д. с., направление которой определяется направлением вращения. Если направление вращения таково, что э. д. с. оказывается направленной встречно к напряжению шин, это вызывает уменьшение тока в цепи машины до некоторой его величины.

Какому же режиму работы такие условия будут соответствовать? Ввиду того что ток попрежнему будет ориентирован в направлении напряжения сети, получится подвод электрической энергии из сети в машину и, следовательно, двигательный режим. Если затем увеличить скорость вращения якоря механическим двигателем, то при том же значении тока, а следовательно, и магнитного потока, э. д. с. будет возрастать. При неизменном напряжении шин разность

$$U - E_a = I_a R_a \quad (179)$$

должна падать, что может иметь место, лишь за счет падения тока. Последний будет, следовательно, уменьшаться по мере

возрастания скорости. Падение тока до нуля получим лишь при бесконечной скорости, так как только тогда может быть выполнено равенство

$$U = E_a.$$

Поскольку ток не может упасть до нуля, то никаким повышением скорости нельзя изменить направления тока, а значит, и перевести машину в генераторный режим. В шунтовой машине такой перевод был вполне возможен.

Обращаясь к другому случаю, когда направление вращения таково, что э. д. с., индуцируемая в роторе двигателя, ориентирована согласно с напряжением сети, имеем, очевидно, последовательное включение рассматриваемой машины и генератора, питающего сеть при коротком их замыкании. Здесь имеет место тот аварийный режим, который может получиться и в шунтовых машинах в случае их включения в параллель при неправильной полярности.

Итак, при обоих направлениях вращения невозможно получение работы последовательного генератора на некоторую сеть с напряжением, фиксированным другой машиной.

Двигательный режим работы осуществляется легко. Этот последний режим может быть, конечно, осуществлен и в том случае, если приключить неподвижный двигатель к сети. Вслед за большим броском тока в первый момент включения двигателя тронется с места, вращаясь при этом всегда в таком направлении, чтобы развить необходимую обратную э. д. с.

Генераторный режим работы последовательной машины может быть осуществлен в том случае, если предварительно подготовить машину к включению, т. е., развернув ее, замкнуть сперва на некоторое сопротивление R (рис. 196) помощью рубильника (b), установив напряжение на зажимах машины, равное напряжению шин. После проверки полярности генератор может быть включен на сеть рубильником (a). Сопротивление R может быть затем постепенно выключено. Вместо тока, туда отдаваемого, машина будет посылать его в сеть. Увеличением скорости генератора можно добиться увеличения отдаваемой им мощности.

Работа такой системы будет, однако, неустойчивой, ввиду чего она практического применения не находит. Здесь важно лишь отметить, что возможность перевода машины в генераторный режим основывается в данном случае на предварительном установлении в обмотке возбуждения тока в направлении э. д. с. машины, тогда как в предыдущих случаях это направление определялось напряжением шин.

Сравнивая теперь случай двигательной и генераторной работы последовательной машины, можем установить, что при изменении направления тока, в связи с переходом из одного режима в другой, изменяется направление магнитного поля. Ввиду того, однако, что машина должна развивать в обоих случаях такую э. д. с., которая была бы направлена против на-

пряжения шин, необходимо, чтобы направления вращения в том и другом режимах были взаимно противоположны. На рис. 197 показано направление вращения, тока и э. д. с. якоря для двух режимов работы последовательной машины — генераторного и двигательного.

В случае машины смешанного возбуждения переход из одного режима в другой осуществляется путем изменения тока в шунте, как и для шунтовой машины. Отметим, однако, что направление ампервитков последовательной обмотки изменяется на обратное. Таким образом, если в генераторном режиме имеем намагничивающее ее действие, то в двигательном получим размагничивание. Последнее может сопровождаться значительным возрастанием скорости якоря. Необходимо поэтому в случае пуска генератора в качестве двигателя переключить последовательную обмотку.

2. Особенности двигательного режима и основные уравнения.

Все сказанное выше о реакции якоря и процессе коммутации тока применительно к генератору может быть легко распространено и на двигатели.

В отношении реакции якоря можно установить, что в шунтовой машине, ввиду изменения направления тока при переходе из одного режима работы в другой, поле якоря получит противоположное направление и будет стремиться переместить нейтральную линию основного поля в сторону, обратную той, куда линия эта перемещалась в генераторном режиме. Так как направление вращения остается неизменным для обоих режимов, то при этом получится смещение нейтрали в сторону, противоположную направлению вращения якоря. В эту же сторону надлежит смещать и щетки в машинах без добавочных полюсов.

Легко видеть, что все сказанное будет справедливо и для последовательной машины. Здесь при переходе в двигательный режим ток в якоре и системе возбуждения, а также направление вращения изменяются на прямо-противоположные. Ввиду этого относительное расположение якоря и полюсов не меняется, но тот сдвиг нейтрали, который в генераторном режиме имел место в направлении вращения якоря, теперь, вследствие изменения этого направления, оказывается сдвигом против вращения.

Отметим, что сдвиг щеток из нейтральной линии в одной и той же машине должен быть в генераторном режиме больше, чем в двигательном, так как условия коммутирования тока

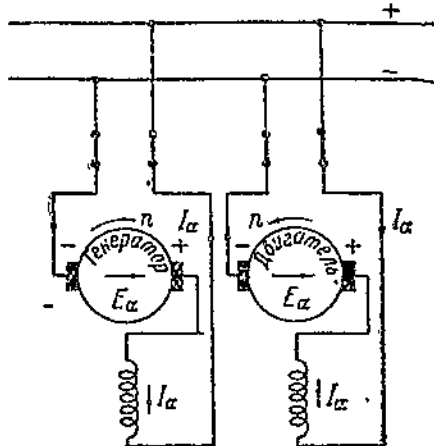


Рис. 197.

в последнем случае легче. Объясняется это тем, что в конце периода коммутации коэффициент самоиндукции короткозамкнутого контура оказывается для генератора больше, чем в начале коммутационного периода, так как короткозамкнутая секция движется от нейтрали к полюсу. Наличие железных масс полюсного наконечника, под который подходит секция, увеличивает коэффициент самоиндукции. Для двигателя явление идет в обратном порядке, так как секция в период короткого замыкания движется от полюса к нейтрали. Поскольку значение э. д. с. самоиндукции в конечный период коммутации определяет, в основном, разность потенциалов между пластиной и покидающей ее щеткой, то условия для образования искры будут, поэтому, всегда более благоприятны в генераторном режиме, чем в двигательном. Ввиду этого надлежит смещать щетки при работе машины генератором на больший угол, чтобы возможно полным уничтожением э. д. с. самоиндукции улучшить коммутацию.

В случае устройства в машине дополнительных полюсов щетки как при двигательном, так и при генераторном режиме должны стоять на нейтрали. При этом, вследствие изменения тока в якоре и в обмотке последовательно включенных с якорем дополнительных полюсов, направление коммутирующего поля при переходе из одного режима в другой меняется. Ввиду того, однако, что направление якорного поля и тока, а следовательно, и э. д. с. самоиндукции, также изменяется на обратное, дополнительные полюса выполняют в обоих режимах свою роль компенсации якорного поля и уничтожения э. д. с. самоиндукции без какого-либо переключения их обмотки.

Переходя теперь к выводу основных уравнений, характеризующих работу машины в двигательном режиме, можно получить выражение для скорости вращения якоря, исходя из ур-ния (179), а именно:

$$U = E_a + I_a R_a, \quad (180)$$

или, подставляя значение E_a из выражения (26)

$$E_a = c n \Phi_a,$$

где

$$c = \frac{10^{-8}}{60} \cdot \frac{pN}{a},$$

получим:

$$U = c n \Phi_a + I_a R_a. \quad (181)$$

Отсюда:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{c \Phi_a}. \quad (182)$$

Выражение (182) и является основным для суждения о скорости машины. Отметим, что поток Φ_a есть результирующий поток машины, обусловленный совместным действием ампервитков полюсов и якоря.

Другим основным выражением является уравнение вращающего момента.

Механическая сила f_x , приложенная со стороны поля к некоторому проводнику, номера x , якоря машины, может быть выражена по закону Био-Савара:

$$f_x = H_x l_a 10^{-1} \text{ дин.}$$

Предполагая проводники расположенными в воздухе, имеем:

$$H_x = B_x,$$

где B_x — индукция в соответствующем месте междужелезного пространства.

Вращающий момент силы f_x будет:

$$m_x = f_x \frac{D}{2} \text{ эргов.}$$

Подставляя значение f_x , а также заменяя ток i_a одной параллельной ветви полным током машин I_a , причем

$$i_a = \frac{I_a}{2a},$$

имеем:

$$m_x = B_x l \frac{I_a}{2a} \frac{D}{2} 10^{-8} \text{ джоулей.} \quad (183)$$

На элементарной дуге якоря dx имеем число проводников:

$$\frac{N}{2p} \frac{dx}{\tau}.$$

Вращающий момент, создаваемый этими проводниками, будет:

$$m_{dx} = B_x l \frac{I_a}{2a} \frac{D}{2} \frac{N}{2p} \frac{dx}{\tau} 10^{-8} \text{ джоулей.} \quad (184)$$

Полный вращающий момент всех проводников якоря выразится тогда так:

$$M = 2pl \frac{I_a}{2a} \frac{D}{2} \frac{N}{2p} \frac{1}{\tau} \int_0^\tau B_x dx 10^{-8} \text{ джоулей,} \quad (185)$$

причем при написании интеграла следует принять во внимание все те оговорки, которые были сделаны ранее при выводе подобной формулы для в. д. с. машины.

Так как

$$\frac{1}{\tau} \int_0^\tau B_x dx = B_{\text{med}} \text{ и } D = \frac{2p\tau}{\pi},$$

то имеем:

$$M = \frac{10^{-8}}{9,81\pi} \frac{NI_a}{2a} p \tau l B_{\text{med}} \text{ kGm} \quad (186)$$

или, замечая, что

$$\tau l B_{\text{med}} = \Phi_a,$$

имеем:

$$M = \frac{10^{-8} \cdot 2}{9,81\pi} \frac{NI_a}{4a} p\Phi_a = k \times \left(\frac{NI_a}{4a} \right) \times (p\Phi_a) \text{ kGm}, \quad (187)$$

что может быть сформулировано словами так: вращающий момент = (постоянная) $\times$ (полные ампервитки якоря) $\times$ (полный поток всех полюсов).

Уравнения (182) и (187) полностью определяют весь рабочий процесс двигателя постоянного тока, являясь основой всего дальнейшего рассмотрения.

3. Пуск двигателей в ход.

Выше, при рассмотрении условий включения машины последовательного возбуждения, было уже указано, что непосредственное включение машин постоянного тока на напряжение сети сопровождается большим толчком тока.

Рассмотрим электродвигатель шунтового возбуждения, который должен быть приведен во вращение из неподвижного состояния путем включения его в сеть.

В начальный момент включения, пока якорь машины не пришел во вращение, сила тока:

$$I_{ak} = \frac{U}{R_a}. \quad (188)$$

Так как R_a мало, то величина тока может во много раз превысить номинальный ток для данной машины.

Немедленно вслед за троганием якоря с места, под влиянием вращающего момента, вызванного взаимодействием поля и тока, в якоре появляется э. д. с.:

$$E_a = cn\Phi_a,$$

после чего уравнение (188) переписывается так:

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a}, \quad (189)$$

откуда видно, что ток уменьшается.

По мере дальнейшего увеличения скорости вращения якоря, падение тока будет продолжаться до тех пор, пока получится равновесие между тормозным моментом, приложенным на валу, и таковым же, развиваемым электромагнитными силами, т. е.:

$$M_t = M_e.$$

Отсюда, подставляя значение M_e из выражения (187), имеем установившееся значение тока:

$$I_a = \frac{M}{k'\Phi_a}. \quad (190)$$

Конечная скорость вращения якоря будет (182)

$$n = \frac{U - I_a R_a}{c\Phi_a}.$$

Интересно установить теперь, какое значение может получить ток якоря в первый момент после включения машины на сеть.

Падение напряжения в якоре при номинальном значении тока I_{aN} будет:

$$I_{aN}R_a = U - E_a = \gamma U,$$

где γ — относительное омическое падение напряжения.

В первый момент по включении имеем, согласно (188):

$$I_{ak}R_a = U.$$

Деля последние уравнения одно на другое, получим:

$$\frac{I_{aN}}{I_{ak}} = \gamma. \quad (191)$$

Величина γ колеблется в пределах 2—10% номинального напряжения U , причем нижний предел имеем для машины большой мощности и высший — для малой. Отсюда ток в момент включения:

$$I_{ak} = (50 \div 10) I_{aN},$$

т. е. весьма велик. Поэтому двигатель постоянного тока должен быть всегда снабжен пусковым реостатом, т. е. регулируемым сопротивлением, вводимым в цепь якоря на время пуска. Лишь двигатели весьма малой мощности, порядка долей киловатта, могут пускаться в ход непосредственным включением в сеть.

При наличии реостата устанавливают перед включением машины в сеть наибольшее значение его сопротивления, которое ограничит ток в первый момент включения до величины, превосходящей номинальное значение тока лишь в 1,3—1,5 раза, поместив ползун реостата в соответствующее положение. Включив двигатель, постепенно выводят сопротивление, следя по амперметру, чтобы ток I_a не превосходил определенного значения (обычно — значения $1,5 I_N$).

При введении сопротивления R_x в цепь якоря имеем в начальный момент пуска ток в якоре:

$$I_a = \frac{U}{R_a + R_x}.$$

Вслед за троганием машины с места появляется обратная электродвижущая сила E_a , после чего имеем:

$$I'_a = \frac{U - E_a}{R_a + R_x}, \quad (192)$$

причем:

$$I'_a < I_a.$$

Дав току несколько уменьшиться, примерно до значения:

$$I''_a = I_{aN},$$

выводим первую ступень реостата, уменьшая его сопротивление. Вслед за этим получаем опять нарастание тока, увеличение скорости и падение тока вследствие увеличения электродвижущей силы E_a . Уменьшая по мере разгона якоря сопротивление реостата, получаем, наконец:

$$R_r = 0,$$

установившуюся скорость и ток двигателя, определяемые уравнениями (182) и (190). Пуск в ход надлежит вести, выводя сопротивление реостата с такой скоростью, чтобы не получилось чрезмерных значений тока I_a , опасных для сети и машины. Вместе с тем никогда не следует из излишней осторожности чрезмерно затягивать пуск, так как это ведет к значительной потере энергии в пусковом реостате и может даже вызвать опасный его нагрев.

Наибольший интерес в условиях пуска представляет время пуска и энергия, теряемая в пусковом реостате. При прочих равных условиях потеря энергии в реостате получается тем меньшей, чем больше допущена сила пускового тока. Ввиду вредного влияния больших токов на питающую двигатель сеть (значительное падение напряжения), а также и на двигатель, идут на указанное выше снижение пускового тока. Этот ток не остается в период разгона двигателя постоянным, а колеблется в известных пределах между $I_{\max}$ и $I_{\min}$. Верхний предел устанавливается в зависимости от допустимого толчка тока, нижний зависит от нагрузки двигателя в период разгона. Зная пусковой момент и задаваясь допустимым толчком тока, устанавливают $I_{\min}$ и $I_{\max}$.

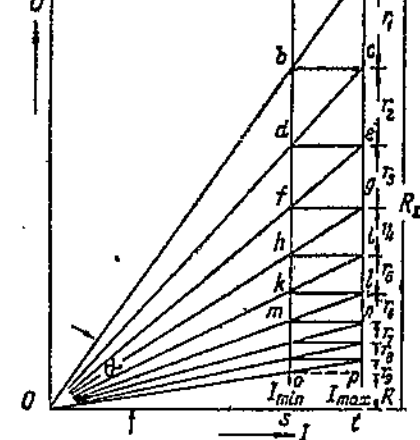


Рис. 198.

Для расчета необходимых сопротивлений ступеней пускового реостата поступают так. Откладывают на оси ординат (рис. 198) значение номинального напряжения двигателя, а по оси абсцисс значения токов $I_{\min}$ и $I_{\max}$; очевидно, что уклон прямой Oa :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{U}{I_{\max}} = R_r,$$

где R_r — суммарное сопротивление всех ступеней реостата.

Это сопротивление может быть отложено в соответствующем масштабе по оси ординат (справа на рис. 198). Как только двигатель приходит во вращение, начинает расти обратная э. д. с., а сила тока падает по прямой Oa . В точке b , которая соответ-

ствует $I_{\min}$, должна быть выведена первая ступень в реостате, вследствие чего ток вновь возрастет до $I_{\max}$, затем с ростом обратной а. д. с. сила тока падает опять и когда дойдет до $I_{\min}$ — точка d , — необходимо вывести вторую ступень и т. д.

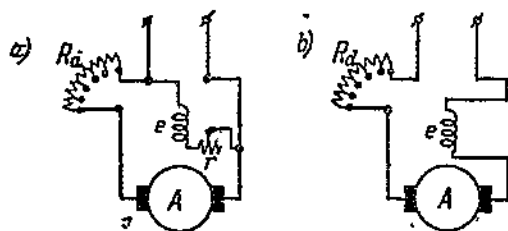


Рис. 199.

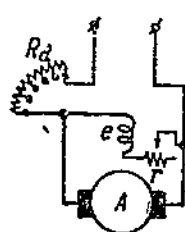


Рис. 200.

Построение продолжают вплоть до точки O , которая определяется отрезком $os = pt = R_a$. Из построения получаем как сопротивления отдельных ступеней $r_1, r_2, r_3 \dots$, так и необходимое их число.

Теоретическая схема включения двигателей шунтового (а) и серийного (b) дана на рис. 199. Здесь R_d — пусковой реостат, A — якорь машины, e — обмотка возбуждения и r — регулировочный реостат в цепи возбуждения шунтовой машины. Отметим, что схема шунтового двигателя должна быть непременно выполнена так, как показано на рис. 199, а, а не так, как на рис. 200, где цепь возбуждения включена за пусковым реостатом.

В течение всего периода пуска необходимо иметь наибольшее значение потока Φ_a , чтобы машина при возможно меньшем токе развила требуемый момент. Ввиду этого обмотка возбуждения должна быть включена на полное напряжение сети с самого начала. Реостат r также должен быть выведен полностью. При включении по неправильной схеме рис. 200 к обмотке возбуждения оказывается приложенным весьма малое напряжение, ввиду чего машина вызывает при пуске чрезмерный ток.

Практически пусковой реостат шунтового двигателя включается обычно так, как это показано на рис. 201. Пусковые сопротивления приключены здесь к отдельным контактам (1, 2, 3 и т. д.), по которым скользит рукоятка, присоединенная другим своим концом к сети. Цепь возбуждения присоединена к той

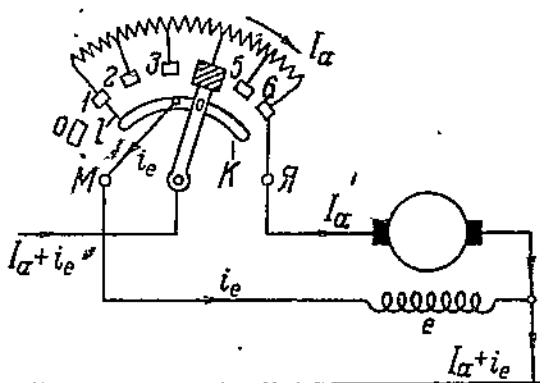


Рис. 201.

пластине реостата, которой касается рукоятка, как только сойдется с первого холостого контакта (O). Ввиду этого цепь возбуждения оказывается во все время пуска под напряжением сети. Соединение пластины K с пусковым сопротивлением проводом преследует ту цель, чтобы при остановке двигателя не размыкать цепь возбуждения. Последняя оказывается тогда замкнутой на якорь двигателя и на все сопротивление пускового реостата. Размыкание цепи было бы крайне нежелательно, так как цепь возбуждения (обмотка возбуждения e) обладает значительной самоиндукцией и при разрыве тока в ней могла бы возникнуть значительная э. д. с., опасная для целостности изоляции обмотки возбуждения. Между тем в данном случае вся электромагнитная энергия исчезающего поля машины расходуется в пусковом сопротивлении и в якоре.

4. Характеристики двигателей постоянного тока.

Рабочие условия двигателя постоянного тока проще всего проследить по его характеристикам.

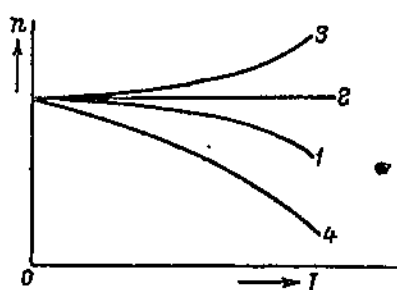


Рис. 202.

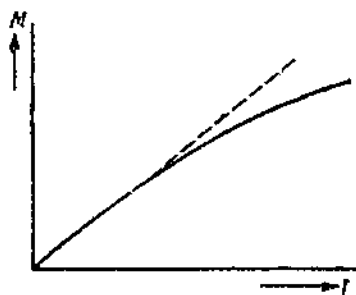


Рис. 203.

Обращаясь к шунтовой машине, рассмотрим прежде всего работу ее под нагрузкой при неизменном значении тока в цепи возбуждения, как это обычно и имеет место на практике. В этом случае наибольший интерес представляет изменение скорости якоря, а также изменение вращающего момента с изменением тока. Обе кривые снимают помощью опыта торможения машины.

Кривая скорости $n = f(I_a)$ дана на рис. 202 в четырех видах. Как видно, скорость может падать, увеличиваться и оставаться неизменной. Обращаясь к ур-нию (182), можно установить, что на скорость двигателя влияет как омическое падение напряжения $I_a R_a$, так и изменение потока Φ_a вследствие реакции якоря. В случае увеличения тока I_a омическое падение возрастает, стремясь уменьшить скорость якоря. То же увеличение тока влечет за собой возрастание якорного поля и уменьшение потока Φ_a (предполагая щетки на нейтрали или сдвинутыми против направления вращения). Скорость стремится увеличиться. Обе причины — падение напряжения и реакция якоря — действуют в противоположных направлениях. Если преобладает влияние падения напряжения, то характеристика получает вид

кривой 1 рис. 202. В случае преобладания реакции якоря имеем кривую 3. Возможна, наконец, компенсация одного влияния другим, чему соответствует кривая 2. Практически, обычно, получается кривая, близкая по форме к кривой 1, т. е. преобладает омическое падение. Изменение скорости обычно невелико ($2-5\%$) и составляет

$$\Delta n = \frac{n_0 - n_N}{n_N},$$

где: n_0 — скорость в холостом ходу,

n_N — скорость при номинальном значении нагрузки.

Вид кривой момента двигателя может быть установлен по основному уравнению:

$$M = k' I_a \Phi_a.$$

Из этого уравнения видно, что при постоянном значении потока момент зависит линейно от тока:

$$M = k'' I_a,$$

т. е. получается прямая линия (рис. 203, пунктирная прямая).

Ввиду того, однако, что поток Φ_a вследствие реакции якоря несколько уменьшается при увеличении тока, имеем отклонение кривой момента в верхней части (рис. 203). Кривые скорости и момента часто строят также в функции полезной мощности, отдаваемой машиной приводу. При этом вид характеристик почти не изменяется.

Некоторый интерес представляют также кривые зависимости тока возбуждения i_a от тока I_a при постоянной скорости вращения. Из того же уравнения (182) видно, что в случае изменения скорости машин с нагрузкой (см. кривые 1 и 3 рис. 202) постоянство скорости можно поддерживать путем изменения тока возбуждения. Получается регулировочная характеристика $i_a = f(I_a)$ при $n = \text{const}$. Вид кривой будет очень близок к соответствующей внешней характеристике, так как в случае падения скорости необходимо ослаблять поток Φ_a , входящий в якорь, чтобы поддержать постоянство n . Наоборот, при повышении скорости с нагрузкой надо увеличивать поле, а следовательно, и ток в цепи возбуждений. Практическое значение кривые могут иметь при выборе регулятора для поддержания постоянства n .

Для двигателя последовательного возбуждения имеют практическое значение лишь кривые $n = f(I_a)$, а также $M = f(I_a)$ при $U = \text{const}$, снятые опытом торможения. Первая из этих кривых $n = f(I_a)$ изображена на рис. 204; как видно, скорость двигателя резко изменяется с изменением тока.

Обращаясь к основному выражению (182)

$$n = \frac{U - I_a R_a}{c \Phi_a},$$

можем переписать его, пренебрегая падением напряжения, так:

$$c \Phi_a n = U. \quad (193)$$

Ввиду того что поток Φ полюсов, если пренебречь насыщением, линейно зависит в последовательной машине от тока I_a , можем положить, что и поток, входящий в якорь, будет равен:

$$\Phi_a = c' I_a. \quad (194)$$

Подставляя последнее выражение в (193), имеем:

$$I_a n = c'', \quad (195)$$

так как U , по предположению, постоянно.

Последнее уравнение представляет гиперболу, отнесенную к асимптотам. На рис. 204 ясно виден этот гиперболический характер кривой. Падение напряжения и реакция якоря, а также насыщение несколько меняют вид данной характеристики, но лишь незначительно.



Рис. 204.

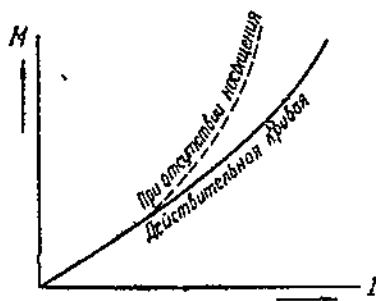


Рис. 205.

Сравнивая данную кривую с такой же, снятой для двигателя шунтового возбуждения (рис. 202), устанавливаем весьма значительную разницу в поведении машин под нагрузкой. Изменение скорости последовательного двигателя весьма велико, тогда как шунтового незначительно. Видом скоростной характеристики, так же как и видом кривой момента $M = f(I_a)$, определяется область применения той и другой машины.

Вид кривой момента последовательного двигателя легко может быть определен на основании ур-ния (187)

$$M = k' \Phi_a I_a.$$

Подставляя значение Φ_a из выражения (194), имеем:

$$M = k'' I_a^2. \quad (196)$$

Отсюда очевидно, что кривая момента имеет параболический характер (рис. 205). Вследствие влияния насыщения магнитный поток изменяется медленнее нарастания тока, ввиду чего практическая кривая насыщенной машины всегда проходит несколько ниже (сплошная, рис. 205). Производя вновь сравнение кривых момента последовательного и шунтового двигателей (рис. 205 и 203), видим существенную их разницу. В последовательной машине момент нарастает при увеличении тока гораздо

быстрее, чем в шунтовой. Этим объясняется применение последовательной машины в тяговых условиях, когда необходимо, чтобы машина развивала (например, на подъемах вагона, приводимого ею в движение) большой момент без значительного возрастания величины тока, так как последнее может вызвать значительное падение напряжения в питающей сети.

Обращаясь еще раз к кривой скорости последовательного двигателя, отметим то существенное обстоятельство, что при холостом ходе двигателя, когда $I_a = 0$, скорость чрезвычайно возрастает, стремясь к бесконечности [см. ур-ния (194) и (182)].

Ввиду того, что в машине существуют потери (например, механические от трения вала о подшипники), даже при холостом ходе получим $I_a \neq 0$ и, конечно, $n \neq \infty$. Тем не менее скорость может в несколько раз превысить номинальную для данной машины, что будет весьма опасно прежде всего для целостности обмотки якоря. Ввиду этого последовательный двигатель нельзя никогда пускать в ход вхолостую. Соединение его с приводом должно быть совершенно жестким, чтобы не произошло случайного сбрасывания нагрузки и разрыва машины. Ременная передача не может быть здесь применена, необходима зубчатая или червячная.

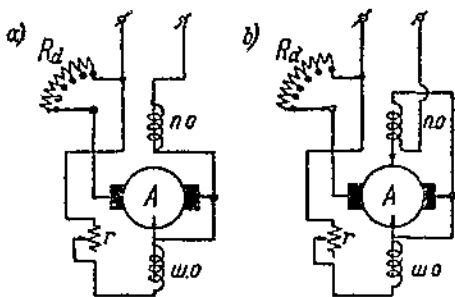


Рис. 206.

Двигатель смешанного возбуждения может иметь последовательную обмотку ($n \cdot o$) включенной как согласно с шунтовой ($ш \cdot o$) (рис. 206, а), так и встречно (рис. 206, б). Кроме того, возможно применить то или иное соотношение ампервитков обеих обмоток.

При согласном включении обмоток имеем характеристики двигателя, промежуточные между кривыми последовательной и шунтовой машин. В случае значительной части ампервитков возбуждения, приходящихся на последовательную обмотку, и незначительной их величины в шунтовой обмотке имеем характеристики двигателя, близкие к таковым у двигателя с последовательным возбуждением, с той только разницей, что при сбрасывании нагрузки скорость якоря не превышает чрезмерно допустимых для машины значений. Такие, по существу, последовательные двигатели со слабой шунтовой обмоткой применяются в случае опасности разброса чисто последовательной машины при сбрасывании нагрузки.

Усиливая шунтовую обмотку и уменьшая соответственно ампервитки последовательной, приближают характеристики к шунтовым. Такие двигатели применяют в тех случаях, когда желательно большее изменение скорости с нагрузкой, чем в шунтовой машине, например если двигатель работает на привод с резко изменяющимся моментом (прокатный стан). В этом

случае можно снабдить двигатель маховиком, который в периоды резкого возрастания нагрузки будет отдавать запасенную живую силу, снижая свою скорость. Последнее возможно только тогда, когда скорость двигателя может претерпевать значительные изменения с нагрузкой, большие, чем в нормальной шунтовой машине.

Двигатели с встречным включением обмоток находят себе применение, когда желают поддержать постоянство скорости привода или даже вести его с большей скоростью при возрастании момента. В этом случае имеем, по существу, шунтовую машину, снабженную слабой последовательной обмоткой. На рис. 207 даны сравнительные характеристики трех типов двигателей: последовательного, параллельного и смешанного возбуждения. Последняя кривая дана для двигателя с согласным включением обмоток возбуждения. Кривая момента имеет здесь также промежуточный характер.

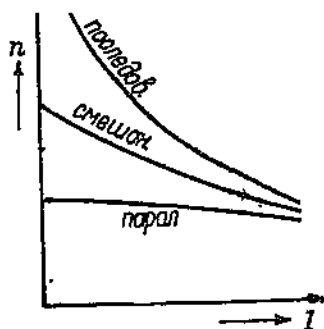


Рис. 207.

5. Регулирование скорости двигателей.

а) Общие соображения. Каждый электродвигатель, будь то машина постоянного или переменного тока, представляет тем большую практическую ценность, чем легче и экономичнее можно регулировать его скорость. В современных условиях, когда все большее

распространение приобретает одиночный привод станка электродвигателем, часто совершенно необходимо вести в широких пределах плавное регулирование скорости привода путем изменения скорости двигателя. Передачи с изменяющимся ступенчатым передаточным числом являются во многих случаях неприменимыми.

Большим достоинством электродвигателей постоянного тока является возможность экономичного и плавного изменения скорости вращения якоря.

В основе рассмотрения процесса регулирования скорости лежат попрежнему два основных уравнения, характеризующие двигательный режим, а именно: уравнение равновесия э. д. с. в контуре двигателя и уравнение равновесия моментов.

Первое из этих уравнений дает выражение для скорости вращения двигателя:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{c \Phi_a},$$

и второе определяет зависимость между током, потоком двигателя и тормозным моментом из равенства:

$$M_e = M_t,$$

где: M_e — электромагнитный момент, развиваемый двигателем, M_t — тормозной момент.

Выражение для M_e определяется на основании равенства (187),

$$M_e = k' I_a \Phi_a,$$

тогда как тормозной момент может быть представлен в виде трех слагаемых:

$$M_t = M_0 + M + M_J, \quad (197)$$

где: M_0 — момент холостого хода, создаваемый механическими потерями (потери на трение в подшипниках, трение щеток о коллектор и т. д.) и потерями в железе (потери на гистерезис и токи Фуко) при холостом ходе двигателя; M — собственно тормозный момент, создаваемый тем приводом, который двигатель приводит во вращение; M_J — момент силы инерции самого двигателя и связанных с ним вращающихся масс.

Выражение момента силы инерции найдем на основании формулы живой силы вращающегося тела:

$$A = \frac{1}{2} J \omega^2,$$

где: J — момент инерции тела, ω — угловая скорость его вращения.

Беря производную, имеем мощность:

$$P = J \omega \frac{d\omega}{dt}$$

и момент:

$$M_J = \frac{P}{\omega} = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Этот последний зависит, таким образом, от ускорения ротора $\frac{d\omega}{dt}$ и равняется нулю при установившейся скорости вращения ($\omega = \text{const}$). При всяком переходном режиме, всегда имеющем место в процессе регулирования скорости, появляется момент M_J .
1 При установившемся режиме:

$$M_e = M_0 + M,$$

или

$$k' I_a \Phi_a = M_0 + M. \quad (198)$$

Уравнения (182), (187) и (197) являются основными, на базе которых будем вести анализ процесса регулирования.

Обращаясь к ур-нию (182), видим, что скорость двигателя представляется возможным регулировать тремя методами: 1) изменением приложенного напряжения U , 2) изменением активного сопротивления в цепи якоря двигателя (под R_a надо в данном случае понимать не только сопротивление самого якоря, каковое изменять в готовой машине невозможно, но и сопротивление того дополнительного реостата, который может быть введен в цепь якоря в видах регулирования), 3) изменением магнитного потока машины, что может быть достигнуто путем изменения тока в цепи возбуждения.

Поскольку способ включения цепи возбуждения оказывает существенное влияние на методику регулирования скорости, необходимо рассмотреть регулирование каждого типа двигателя отдельно.

б) Регулирование скорости шунтового двигателя. Наиболее широкие пределы регулировки шунтового двигателя могут быть получены при изменении приложенного к машине напряжения U . Этот способ находит себе применение на практике при регулировке крупных электродвигателей металлургических заводов, а также там, где ширина пределов регулирования является обязательной. В этом случае приходится иметь, кроме регулируемого двигателя, источник

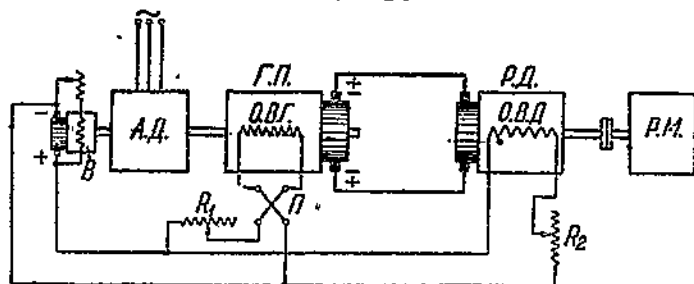


Рис. 208.

изменяющегося в широких пределах напряжения в виде генератора постоянного тока, приводимого во вращение особым двигателем переменного тока (синхронным или асинхронным). Получается так называемая группа Леонарда. В некоторых случаях агрегат, питающий двигатель, снабжают маховиком, необходимым для сглаживания толчков нагрузки. Схема носит в этом случае наименование группы Леонарда-Ильгнера. На рис. 208 приведена схема Леонарда.

Здесь:

АД — асинхронный двигатель, приводящий во вращение регулирующий агрегат,

ГП — генератор постоянного тока,

РД — регулируемый двигатель постоянного тока,

РМ — регулируемый механизм (например прокатный стан),

В — возбуждатель, питающий цепи возбуждения обеих машин постоянного тока (о. в. г. — обмотку возбуждения генератора и о. в. д. — обмотку возбуждения двигателя),
 R_1 и R_2 — реостаты в цепях возбуждения,

П — переключатель цепи возбуждения генератора, необходимый для изменения полярности этой машины при реверсе регулируемого двигателя.

Заметим, что никаких реостатов в цепи якоря двигателя здесь нет, так как пуск в ход, так же как и регулирование скорости двигателя, производится путем изменения напряжения генератора. Обратимся к процессу регулирования.

Примем, что двигатель пущен в ход постепенным подъемом

напряжения генератора и работает, вращаясь с некоторой установившейся скоростью, равной n оборотам якоря в минуту. Тормозной момент:

$$M + M_0 = M_{e1}$$

предположим постоянным, независящим от скорости. Положим, что необходимо увеличить скорость двигателя. Увеличим напряжение генератора, воздействуя реостатом R_1 на ток в цепи его возбуждения. Магнитный поток генератора нарастет до нового установившегося значения весьма быстро, так как электромагнитная инерция магнитной цепи генератора относительно невелика¹⁾ благодаря принимаемым мерам, как, например, расчленению железа не только якоря, но и полюсов и ярма. Ввиду относительно малой величины времени установления потока генератора по сравнению со всем временем переходного режима при регулировании будем считать, что напряжение на генераторе повышается мгновенно.

Вслед за повышением напряжения генератора должно иметь место новое уравнение равновесия в д. с. До регулирования имели:

$$U_1 = E_{a1} + I_{a1} R_a$$

После изменения напряжения генератора получим:

$$U_2 = E_{a2} + I_{a2} R_a,$$

так как обратная э. д. с. двигателя E_{a1} не успела измениться вследствие механической инерции двигателя и связанных с ним масс привода.

Новое значение тока:

$$I_{a2} = \frac{U_2 - E_{a1}}{R_a} + I_{a1}$$

получится больше I_{a1} , так как $U_2 > U_1$.

Ввиду неизбежного при увеличении тока избытка электромагнитного момента двигателя:

$$M_{e2} > M_c,$$

так как:

$$k' I_{a2} \Phi_a > k' I_{a1} \Phi_a,$$

то избыток момента идет на ускорение двигателя, в связи с чем появляется тормозящий момент силы инерции и уравнение равновесия моментов принимает вид:

$$M_{e2} - J \frac{d\omega}{dt} = M_c = M_0 + M.$$

Двигатель ускоряется; при этом начинает расти обратная э. д. с. E_{a2} , что вызывает падение тока. Ускорение продолжается до тех

¹⁾ Эта инерция обусловлена тем обстоятельством, что при изменении потока генератора в его магнитной цепи будут создаваться токи Фуко, препятствующие установлению потока.

пор, пока не будет вновь восстановлено равновесие моментов:

$$M_{a1} = M_0 + M,$$

а так как M_{a1} при неизменном потоке может быть получен лишь при прежнем значении тока I_{a1} , то, очевидно, новое уравнение равновесия а. д. с. будет иметь вид:

$$U_2 = E_{a1} + I_{a1} R_a,$$

откуда новая скорость:

$$n_2 = \frac{U_2 - I_{a1} R_a}{c\Phi_a},$$

т. е. новая скорость зависит только от нового значения напряжения.

Если пренебречь падением напряжения, составляющим обычно небольшой процент от напряжения U , то имеем:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{U_2}{U_1}, \quad (199)$$

т. е. скорость вращения изменяется пропорционально приложенному к двигателю напряжению.

Схема Леонардо экономически оправдывается лишь там, где необходимы весьма широкие пределы регулирования скорости порядка 5/1 и более. В случае меньших пределов регулирования, в особенности в двигателях малой мощности, возможно пользоваться вторым методом, а именно введением сопротивления в цепь якоря. В этом случае предполагается, что напряжение питающей двигатель сети остается неизменным и вся регулировка ведется реостатом, включенным в цепь якоря двигателя. Ток возбуждения сохраняется при этом неизменным.

Наибольшая скорость двигателя получится тогда при отсутствии регулирующего сопротивления в цепи якоря и будет равна:

$$n_1 = \frac{U_1 - I_{a1} R_a}{c\Phi_a}.$$

При введении сопротивления R_d неизбежно изменится сила тока. Получим новое значение тока из выражения:

$$I_{a2} = \frac{U - c n_1 \Phi_a}{R_a + R_d},$$

а скорость не успеет измениться.

Ввиду того что регулирование предположено так же, как и ранее, при неизменном значении тормозного момента $M_0 + M$, то, очевидно, в связи с падением тока до величины I_{a2} уменьшится электромагнитный момент машины. Якорь начнет замедляться. В период замедления будем иметь равенство:

$$M_{a2} + J \frac{d\omega}{dt} = M_0 + M,$$

так как недостающий момент будет теперь покрыт за счет момента силы инерции ротора.

Обратная э. д. с. двигателя будет при замедлении падать, что поведет к нарастанию тока. Когда ток достигнет прежней величины, получим новую установившуюся скорость:

$$n_3 = \frac{U_1 - I_{a1}(R_a + R_d)}{c\Phi_a}; \quad (200)$$

очевидно, что

$$n_3 < n_1.$$

Снижение скорости получится, однако, при значительном увеличении потерь электрической энергии. Из уравнений равновесия э. д. с. до и после снижения скорости:

$$U_1 = E_{a1} - I_{a1}R_a$$

$$U_1 = E_{a3} - I_{a1}(R_a + R_d)$$

имеем после вычитания второго уравнения из первого:

$$E_{a1} - E_{a3} = I_{a1}R_d$$

или

$$(n_1 - n_3)c\Phi_a = I_{a1}R_d.$$

Умножая и деля на n_1 , имеем:

$$\frac{n_1 - n_3}{n_1} c\Phi_a n_1 = I_{a1}R_d.$$

Обозначая:

$$\Delta n = \frac{n_1 - n_3}{n_1}$$

и замечая, что

$$c\Phi_a n_1 = E_{a1},$$

имеем:

$$\Delta n = \frac{I_{a1}R_d}{E_{a1}}.$$

Умножая числитель и знаменатель последнего уравнения на ток I_{a1} , имеем:

$$\Delta n = \frac{I_{a1}^2 R_d}{I_{a1} E_{a1}} = \frac{p'_d}{P_e}; \quad (201)$$

здесь: p'_d — потеря в регулирующем реостате, P_e — электромагнитная мощность двигателя.

Последнее уравнение показывает, что полученное уменьшение скорости пропорционально джоулевой потере в регулирующем реостате, поскольку значение P_e можно считать неизменным, если постоянен тормозной момент. Если уменьшить скорость вдвое, путем введения дополнительного сопротивления R_d , то потеря энергии в реостате составит половину всей мощности двигателя (электромагнитную мощность можно считать с некоторым приближением равной мощности на валу). Отсюда очевидна малая экономичность такого способа регулирования.

Значительным недостатком данного способа регулирования является еще и то обстоятельство, что при наличии сопротивления R_a внешняя характеристика двигателя теряет свой пунтовый характер и получает вид кривой 4 рис. 202. Скорость резко меняется при изменении нагрузки. Регулирование помощью реостата в роторе надлежит поэтому вести лишь в ограниченных пределах и применять только тогда, когда установка агрегата Леопарда оказывается заведомо менее экономичной вследствие больших первоначальных затрат.

Третий метод регулирования—изменением тока в цепи возбуждения—является наиболее простым и экономичным. Он дает, однако, возможность лишь повысить скорость двигателя до определенного предела. Рассмотрим сперва случай, когда регулирование производится при холостом ходе двигателя.

Имеем:

$$I_a \approx 0 \text{ и } E = U - I_a R_a \approx U.$$

Тогда ур-ние (182) перепишется так:

$$n = \frac{U}{c\Phi_a}. \quad (202)$$

Ввиду постоянства U скорость будет изменяться обратно пропорционально магнитному потоку полюсов, так как при холостом ходе реакция якоря отсутствует:

$$\Phi_a = \Phi_0.$$

Таким образом, включив реостат в цепь обмотки возбуждения (см. рис. 199, а), можно путем изменения его сопротивления добиться установления любого значения магнитного потока Φ_0 , а следовательно, изменять скорость в весьма широких пределах. На рис. 209 дана кривая $n = f(i_a)$ при холостом ходе двигателя; как видно, скорость меняется сперва медленно при изменении тока возбуждения, а затем быстро при малых значениях i_a . Объясняется это насыщением магнитной цепи машины при больших значениях i_a , вследствие чего поле меняется первоначально весьма мало при изменении i_a и лишь с переходом на прямолинейную часть кривой намагничивания получается быстрое изменение потока.

Предел увеличения скорости будет поставлен тем, что с возрастанием ее будут увеличиваться потери в машине. Ввиду необходимости покрытия этих потерь, за счет внешней сети, питающей машину, возрастет ток якоря, а при таких условиях пренебречь падением напряжения будет уже нельзя, так как оно будет стремиться уменьшить э. д. с. машины, а вместе с тем и ее скорость.

Из ур-ния (202) следует, что при $\Phi_0 = 0$ получим $n = \infty$, т. е. если выключить цепь возбуждения совсем, то скорость получит весьма высокое значение, опасное для целостности якоря машины.

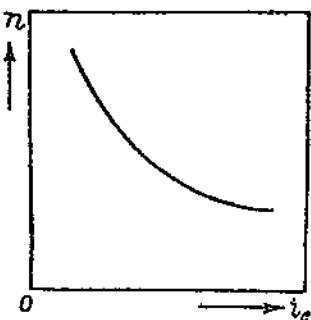


Рис. 209.

Поэтому случайный обрыв цепи возбуждения работающей машины весьма опасен. Вследствие появления токов Фуко в массивных частях магнитной цепи исчезновение поля Φ_a будет задерживаться, ввиду чего скорость немедленно вслед за обрывом цепи возбуждения начнет быстро парастать. Ток якоря будет при этом также увеличиваться, снижая э. д. с. Перейдя некоторую предельную скорость, которая может быть весьма высокой, двигатель начнет останавливаться, так как при $\Phi_a = 0$ вращающий момент M будет равен нулю и остановка якоря неизбежна. Если при переходе через наибольшую скорость якорь и не будет механически поврежден, то в случае чрезмерно солидных предохранителей в электрической цепи возможен перегрев якоря и сгорание изоляции обмотки вследствие чрезмерного значения тока. Шунтовой двигатель должен быть поэтому всегда защищен предохранителями или максимальным автоматом, установленным на соответствующую силу тока, превышающую номинальное значение лишь настолько, чтобы в течение периода пуска машины случайный толчок тока не вызвал отключения двигателя.

Регулировать скорость двигателя помощью изменения тока в цепи возбуждения можно, конечно, и под нагрузкой. В этом случае скорость определится ур-нием (182), причем с изменением потока будет меняться и ток якоря, связанный с ним выражением момента (187).

Если уменьшить поток, то при неизменном значении тормозного момента будет расти ток I_a , стремясь уменьшить скорость. Ввиду того, что величина падения напряжения $I_a R_a$ относительно мала по сравнению с напряжением U , получится все же возрастание скорости. Предел ее повышения будет поставлен, как и при холостом ходе, увеличением тока. Предел будет, однако, здесь ниже, так как при нагрузке одному и тому же значению Φ_a будет отвечать больший ток I_a . Выясним, до какого предела будет увеличиваться скорость при условии постоянства тормозного момента.

Определим магнитный поток двигателя:

$$\Phi_a = \frac{M}{k' I_a}.$$

Подставим это выражение в выражение для числа оборотов в минуту:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{c \Phi_a} = \frac{I_a U - I_a^2 R_a}{c K M},$$

где $K = \frac{1}{k'}$.

Возьмем производную по току и приравняем ее нулю:

$$\frac{dn}{dI_a} = \frac{U - 2I_a R_a}{c K M} = 0,$$

что дает:

$$I_a R_a = \frac{U}{2}. \quad (203)$$

Оказывается, таким образом, что скорость будет возрастать до тех пор, пока падение напряжения не станет равным половине приложенного напряжения; в дальнейшем начнется падение скорости вместо ее увеличения. Практически, указанный предел легко получить в том случае, если ввести дополнительное сопротивление в цепь якоря и при этом увеличивать скорость путем уменьшения тока в цепи возбуждения. Регулирование скорости изменением тока возбуждения получается, таким образом, тем эффективнее, чем меньше сопротивление в цепи якоря.

Способ регулировки числа оборотов изменением тока цепи возбуждения является весьма экономичным, так как вся регулировка ведется в цепи с весьма малым током, составляющим 3—5% от I_a . Ввиду этого любые изменения тока i_e и сопротивления сказываются на общей величине потерь весьма мало. Другие потери в машине, конечно, также изменяются при регулировании, но изменение это в случае регулирования в небольших пределах мало сказывается на коэффициенте полезного действия машины.

Регулирование скорости помощью изменения тока в цепи возбуждения имеет тот недостаток, что наименьшая достижимая скорость определяется тем током в цепи возбуждения, который имеет место при выведенном полностью сопротивлении.

Этот ток возбуждения обычно близок к тому, который дает номинальное число оборотов в минуту при номинальном напряжении. Ввиду этого основной диапазон регулирования идет при скоростях, больших номинальной. При этом предел увеличения скорости ставится механической прочностью данной конструкции двигателя. Ориентировочно можно допустить следующие пре-

ТАБЛИЦА 6.

Мощность двигателя в kW	Допустимое увеличение числа оборотов в % от номинального
1—5	50—60
5—25	до 40
25—50	" 30
50—100	" 25
свыше 100	" 20

дельно допустимые превышения скорости над номинальной (табл. 6).

Необходимо, однако, иметь в виду, что нормы по электрическим машинам не предусматривают никакого увеличения скорости двигателей сверх номинальной.

Ввиду того что шунтовые машины малых мощностей рассчитываются

очень часто на возможную работу как в двигательном, так и в генераторном режимах, причем в генераторном со скоростью (n_g) всегда большей, чем в двигательном (n_d)¹⁾,

¹⁾ В двигательном режиме э. д. с. $E_{ad} = U - I_a R_a$, тогда как в генераторном $E_{ag} = U + I_a R_a$. Если желательно иметь в обоих случаях один и тот же поток, а следовательно, и одинаковый электромагнитный момент, то, очевидно, надо, чтобы

$$n_g > n_d.$$

то, очевидно, известный запас в отношении допустимого увеличения скорости есть. Этот запас, во всяком случае, не меньше, чем необходимое увеличение скорости для перехода в генераторный режим.

Во всяком случае, если требуется увеличение скорости более, чем на 25 — 30%, то необходимо прибегать к специальным конструкциям двигателей. Можно построить шунтовой двигатель с регулировкой в отношении 2/1 и даже 3/1.

Сравнивая различные методы регулирования скорости, необходимо остановиться еще на одной стороне процесса регулирования, а именно: на изменении мощности и момента двигателя при регулировании и на необходимом соответствии этого изменения таковому же привода.

В случае регулирования скорости путем изменения напряжения генератора Леонардовской группы имеем неизменным магнитный поток регулируемого двигателя. Допуская одну и ту же номинальную силу тока при всех напряжениях, а следовательно, и при всех скоростях вращения двигателя, имеем неизменный электромагнитный момент на всех скоростях. Это значит, что тот тормозный момент, которым можно загружать вал двигателя, также может быть одним и тем же на всех скоростях и равным номинальному моменту двигателя. Имеем в этом случае момент:

$$M_e = \text{const}, \quad (204)$$

и мощность

$$P_e = M_e \omega = M_e \frac{2\pi n}{60} = (\text{const}) \times n, \quad (205)$$

т. е. мощность двигателя при регулировании скорости изменением напряжения, приложенного к якорю, изменяется пропорционально числу оборотов якоря в минуту, а момент остается постоянным.

В случае регулирования скорости изменением тока возбуждения имеем, допуская вновь неизменной силу тока в якоре, выражение момента:

$$M_e = k' I_a \Phi_a = (\text{const}) \times \Phi_a.$$

Если пренебречь падением напряжения в якоре машины, то можно считать, согласно ур-нию (202), что

$$n \Phi_a = \text{const},$$

откуда найдем:

$$M_e = \frac{\text{const}}{n}. \quad (206)$$

Для мощности получим

$$P_e = M_e \omega = M_e \frac{2\pi n}{60} = \frac{\text{const}}{n} \frac{2\pi n}{60} = \text{const}, \quad (207)$$

т. е. мощность двигателя при регулировании скорости изменением тока в цепи возбуждения

остается неизменной на всех скоростях, момент меняется обратно пропорционально скорости.

Для того чтобы двигатель был наилучшим образом использован на всех скоростях, т. е. чтобы он работал всегда при неизменном, номинальном значении тока в якоре, надо, чтобы характеристики момента и мощности привода полностью соответствовали таковым же двигателя.

Так, если применить регулирование помощью изменения возбуждения при постоянстве тормозного момента привода, то придется так рассчитать двигатель, чтобы он мог развить этот момент при наименьшем ослаблении поля. Тогда очевидно, что на малых скоростях момент, который возможно снять с двигателя, окажется значительно больше, так как поле будет на этих скоростях сильнее и потребляемый двигателем ток станет меньше

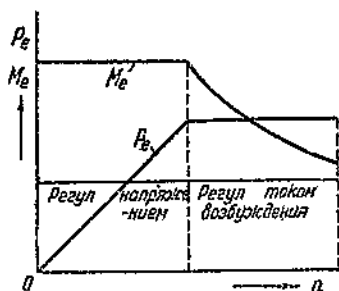


Рис. 210.

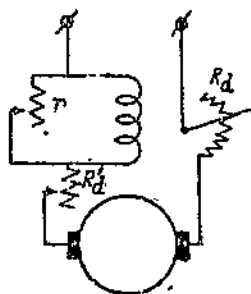


Рис. 211.

номинального. Тот момент, который двигатель будет в состоянии развить на наименьшей скорости, значительно превзойдет требуемый. Поскольку, однако, размеры и вес двигателя определяются не мощностью, а моментом, то, очевидно, придется взять более тяжелый двигатель, чем в том случае, когда регулирование производится при $M = \text{const}$ помощью регулировки изменением напряжения.

При выборе системы регулирования приходится всегда считаться с видом кривой момента привода и выбирать систему, дающую наилучшее использование двигателя. В некоторых случаях применяют комбинированную систему регулирования скорости. Так, например, в агрегатах Леонарда регулировку ведут следующим образом. От неподвижного состояния двигателя до его номинальной скорости регулировка ведется по схеме постоянного момента помощью изменения напряжения генератора при неизменном возбуждении двигателя. Регулировка скорости сверх номинальной производится помощью изменения возбуждения двигателя при постоянном напряжении на зажимах якоря. На рис. 210 даны кривые мощности и момента двигателя при такой регулировке. Момент остается постоянным вплоть до номинальной скорости и затем падает по закону гиперболы. Мощность меняется первоначально по линейному закону, а затем остается постоянной.

Такой способ регулирования дает наименьшую мощность всей установки, так как позволяет выбирать генератор лишь на номинальную мощность двигателя.

с) Регулирование скорости серийного двигателя. Серийный двигатель допускает регулирование скорости по существу теми же способами, что и шунтовой.

Необходимо лишь ввиду особенности последовательной схемы иначе включить регулирующий реостат в случае регулировки путем изменения потока Φ_a .

На схеме рис. 211 показано включение этого реостата параллельно к обмотке возбуждения полюсов машины. Ответвляя через него тот или иной ток, можно менять ампервитки возбуждения при том же значении тока в якоре и, следовательно, регулировать скорость.

Предполагая работу двигателя при постоянном значении момента, можем определить ток в цепи машины при $r=\infty$, согласно выражению (196), которое дает:

$$I_a = \sqrt{\frac{M}{k''}}. \quad (208)$$

Скорость вращения определится тогда согласно уравнению (182).

Включая теперь реостат r и устанавливая некоторое значение его сопротивления r_1 , имеем соотношение токов в обмотке возбуждения (I_s) и шунтирующем ее реостате (I_r):

$$\frac{I_r}{I_s} = \frac{R_s}{r_1}. \quad (209)$$

С другой стороны, согласно уравнению момента,

$$M = k'' I_s I'_a. \quad (210)$$

Первый закон Кирхгофа дает:

$$I'_a = I_r + I_s. \quad (211)$$

Из ур-ния (209) определим:

$$I_r = I_s \frac{R_s}{r_1} \dots$$

Подставив значение I_r в ур-ние (211), имеем:

$$I'_a = I_s \frac{R_s}{r_1} + I_s.$$

Уравнение (210) дает:

$$I_s = \frac{M}{k'' I'_a},$$

после чего можно написать:

$$I'_a = \sqrt{\frac{M}{k''} \left(\frac{R_s}{r_1} + 1 \right)}. \quad (212)$$

Сравнивая токи I_a и I'_a из выражений (208) и (212), имеем их соотношение:

$$\frac{I'_a}{I_a} = \sqrt{\frac{R_s}{r_1} + 1}. \quad (213)$$

Отсюда очевидно, что ток $I'_a > I_a$. В практических условиях принимают $\frac{R_s}{r_1} \leq 1$, что соответствует предельной шунтировке в 50%; при этом имеем:

$$\frac{I'_a}{I_a} = \sqrt{2} = 1,42,$$

т. е. увеличение тока на 42%.

Обращаясь к уравнению скорости, получим при отсутствии шунтировки:

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_s)}{c'' I_a} \quad (214)$$

или при шунтировке:

$$n' = \frac{U - I'_a \left(R_a + \frac{r_1 R_s}{r_1 + R_s} \right)}{c'' I'_a \left(\frac{r_1}{R_s + r_1} \right)}. \quad (215)$$

Подставляя значение тока $I'_a = 1,42 I_a$, а также $\frac{R_s}{r_1} = 1$, имеем:

$$n' = \frac{U - 1,42 I_a (R_a + 0,5 R_s)}{c'' \cdot 1,42 I_a \cdot 0,5}. \quad (216)$$

Полагая $R_a \cong R_s$, имеем из (216) и (214):

$$n' \cong \frac{U - 2 I_a R_a}{0,71 c'' I_a}; \quad n \cong \frac{U - 2 I_a R_a}{c'' I_a},$$

откуда:

$$\frac{n'}{n} = \frac{1}{0,71} = 1,4,$$

т. е. скорость возрастает на 40%.¹⁾ Следовательно можно изменять скорость, хотя и в более узких пределах, чем в двигателе шунтового возбуждения.

Указанный способ регулирования скорости позволяет только увеличивать ее по сравнению с номинальной. В случае необходимости снизить скорость можно ввести реостат (R'_a) последовательно с якорем и обмоткой возбуждения так же, как это делали ранее (см. рис. 211).

Все сказанное выше о регулировании скорости сопротивлением в якоре применимо к серийному двигателю. Способ мало экономичен, но все же находит себе применение на практике (например, в трамвае).

¹⁾ Отметим, что цифра эта, как и весь приведенный здесь вывод, лишь приближенные, так как не принята во внимание связь между током возбуждения и магнитным потоком, определяемая кривой намагничивания.

В случае двигателя со смешанным возбуждением, регулирование ведут так же, как и шунтового. Чаще всего изменяют сопротивление цепи шунтовой обмотки возбуждения.

ГЛАВА X.

ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ В МАШИНЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ.

1. Общие соображения и классификация потерь.

Работа любого механизма, преобразующего один вид энергии в другой, всегда сопровождается неизбежной потерей энергии. В электрических машинах, преобразующих механическую энергию в энергию электрического тока (генераторы) или, наоборот, электрическую энергию в механическую (электродвигатели), также имеют место некоторые, хотя и относительно небольшие, потери. Малая величина потерь в электрических машинах выгодно отличает их от других механизмов, например тепловых двигателей. В больших электрических машинах имеем всего 3—4% потерь по сравнению с полной величиной подводимой к машине мощности.

Столь малая величина потерь энергии не значит, однако, что вопрос о потерях может быть опущен из общего комплекса вопросов, подлежащих внимательному изучению. При мощностях машин, входящих в случае машин постоянного тока до 5000—6000 kW, каждый 1% потерь составляет мощность порядка 50—60 kW, достаточную для электропривода и освещения небольшого промышленного предприятия. При малых мощностях имеем благодаря массовому распространению машин сумму потерь, составляющую в общем балансе энергетики страны весьма высокую цифру (тем более, что относительная величина потерь в малых машинах больше). Энергия, идущая на покрытие потерь электрической машины, переходит в конечном счете в тепло, которое бесполезно рассеивается, будучи передано машиной окружающей ее среде—воздуху. Помимо самого факта бесполезного расходования энергии, имеем при этом повышение температуры отдельных частей машины над температурой окружающей среды, что в случае чрезмерного выделения тепла может привести к перегреву машины. Изоляционные материалы, входящие неизбежно в машину в виде, например, хлопчатобумажной пряжи, изолирующей проводники обмотки якоря и возбуждения, могут прийти в полную негодность в случае чрезмерного повышения температуры частей, соприкасающихся с ними.

Таким образом вопрос потерь в электрической машине связан, во-первых, с экономичностью и, во-вторых, с надежностью работы машины.

Теоретическое изучение потерь и полученные в результате его формулы должны быть всецело подкреплены и проверены экспериментальными данными, ввиду чего изуче-

ние потерь неизбежно связывается с методами их экспериментального определения и разделения на отдельные составляющие.

Конечные формулы и экспериментально полученные коэффициенты дают возможность установить надежные методы расчета потерь в проектируемых машинах.

Этот расчет не должен, однако, носить формы простой, констатации той или иной величины потери в данной части машины.

Путем соответствующего перераспределения потерь удастся часто значительно сократить габариты и вес машины, придав ей в то же время наиболее удачные формы с конструктивной стороны. Целый ряд успехов наших заводов в области создания новых облегченных и улучшенных типов электрических машин оказался возможным только после тщательного анализа элементов потерь и правильного расчета машины на основе установленного наиболее выгоднейшего их распределения.

Природа отдельных потерь достаточно выяснена, и классификация их вполне установлена в следующем виде.

Имеем четыре основные группы потерь:

- А) потери механические,
- В) потери магнитные (называемые часто потерями в железе),
- С) потери джоулевы или потери в меди,
- Д) потери дополнительные.

Каждая группа имеет, в свою очередь, ряд подразделений.

А. Механические потери состоят из:

- 1) потерь в подшипниках,
- 2) потерь на трение вращающихся частей о воздух и вентиляционных,
- 3) потерь на трение щеток о коллектор.

В. Потери магнитные разделяются на:

- 1) потери на гистерезис в сердечнике якоря и зубцах,
- 2) потери на токи Фуко в сердечнике якоря и зубцах.

С. Потери на джоулев эффект наблюдаются:

- 1) в обмотке якоря,
- 2) в обмотках добавочных полюсов, компенсационной и последовательной,
- 3) в параллельной обмотке возбуждения главных полюсов,
- 4) в переходном контактном слое между коллектором и щетками.

Потери дополнительные не имеют строгой классификации; наиболее существенные из них:

- 1) потери на токи Фуко в обмотке якоря вследствие изменения тока при коммутации,
- 2) потери в железе (дополнительные на токи Фуко и гистерезис), вызванные неравномерным распределением поля машины вследствие реакции якоря.

2. Механические потери и их определение.

Потери в подшипниках зависят прежде всего от их конструкции. В электрических машинах применяют подшип-

ники скользящего трения, состоящие из стояка, выполненного часто за одно целое с подшипниковым щитом, чугунного вкладыша, залитого баббитом, и смазочного кольца.

Весьма часто применяют также шариковые и роликовые подшипники, основным ценным свойством которых является малая величина потерь на трение. Помимо малой величины потерь, шариковые и роликовые подшипники обладают еще целым рядом преимуществ, как-то:

а) коэффициент трения μ составляет у шариковых подшипников 0,01—0,002, у роликовых—0,002—0,003, причем он неизменен как при трогании с места, так и при вращении, тогда как в подшипниках скользящего трения μ составляет в среднем 0,005 при работе и 0,25 при трогании с места; последнее весьма невыгодно, особенно в применении к машинам с частыми пусками в ход (тяговые двигатели);

б) смазка роликовых и шариковых подшипников получается хорошей даже при работе их в наклонном положении;

с) ухода за этими подшипниками почти не требуется, так как обновлять смазку приходится весьма редко;

д) получается сбережение смазочного материала;

е) большая эксплуатационная надежность;

ф) небольшая длина в направлении оси машины;

г) отсутствие износа, что позволяет не бояться задевания вращающейся части машины за неподвижную даже при малом воздушном зазоре;

h) возможность быстрой замены, так как подшипники стандартизованы в порядке международного соглашения.

Шариковые и роликовые подшипники применяются, главным образом, в машинах малой и средней мощности, подшипники скользящего трения—в машинах большой мощности.

На рис. 212 дан разрез двух шариковых подшипников электрической машины с маслоуплотняющей коробкой (а). Рис. 213 иллюстрирует подшипник скользящего трения.

Для определения потерь на трение в подшипниках необходимо установить основные закономерности, лежащие в основе процесса трения.

Потери на трение могут быть выражены через работу трения A_r , kGm/sec в следующем виде:

$$P_r = 9,81 A_r \text{ (ватт)}. \quad (217)$$

Работа трения равна:

$$A_r = \mu Qv, \quad (218)$$

где: μ — коэффициент трения, Q — давление на подшипник в килограммах, v_z — скорость вращения цапфы в м/сек.

Коэффициент трения μ зависит от ряда факторов, как-то: давления на подшипник, температуры, скорости вращения цапфы и сорта смазывающего масла. Зависимость коэффициента трения от этих величин определяется, на основании опытов Тауера (Tower) и Деттмара, следующими тремя зависимостями, именуемыми законами трения.

Первый закон гласит, что при постоянной температуре подшипника и неизменной скорости вращения цапфы коэффициент трения изменяется обратно пропорционально удельному давлению

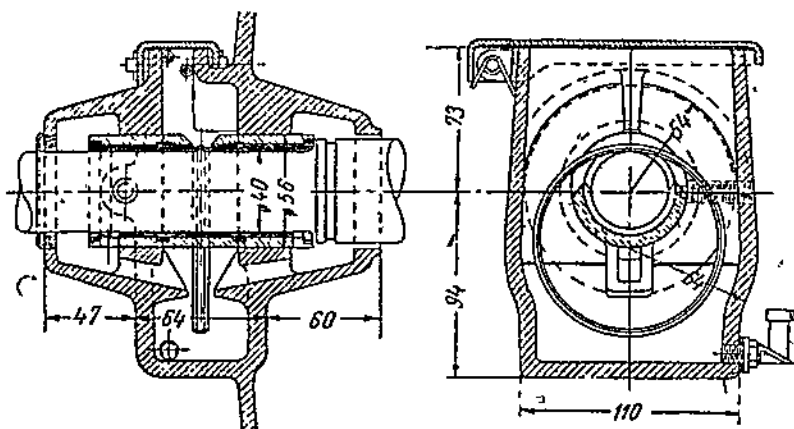


Рис. 213.

нию q_z (kg/cm^2), если только это давление не превышает 30—44 kg/cm^2 . Имеем выражение этого закона в виде:

$$q_z \mu = \text{const.} \quad (219)$$

Отметим, что под удельным давлением q_z понимают давление, приходящееся на 1 cm^2 проекции поверхности цапфы на плоскость, параллельную оси цапфы.

Второй закон гласит, что при постоянном удельном давлении на подшипник q_z и постоянной скорости вращения цапфы коэффициент трения обратно пропорционален температуре Θ_z , т. е.

$$\mu \Theta_z = \text{const.} \quad (220)$$

Последнее верно в пределах температур 15—50° C.

Третий закон дает зависимость коэффициента трения от скорости вращения цапфы. При постоянной температуре и давлении, коэффициент трения изменяется пропорционально корню квадратному из скорости вращения цапфы v_z (м/сек). Имеем:

$$\mu = \text{const.} \sqrt{v_z}. \quad (221)$$

Указанная зависимость справедлива для скоростей цапфы, не превосходящих 4 м/сек. При увеличении скорости сверх

этой величины коэффициент трения растет все медленнее и медленнее и, наконец, при $v_z = 10$ м/сек становится постоянным.

Подставляя выражение (218) в (217) и замечая, что

$$Q = q_z d_z l_z, \quad (222)$$

имеем:

$$p_r = 9,81 \mu q_z v_z d_z l_z. \quad (223)$$

В этих уравнениях: l_z — длина цапфы в сантиметрах, d_z — диаметр цапфы в сантиметрах, q_z — удельное давление в kg/cm^2 .

Применяя приведенные выше законы, можем установить на основании их приложения к ур-нию (223) следующие важные положения.

Потери на трение не зависят от нагрузки машины, так как, согласно ур-нию (219), возрастание q_z ведет к уменьшению μ . Отсюда ясно, что при изменении натяжения ремня, в связи с возрастанием тормозного момента привода, потеря p_r остается неизменной. Это обстоятельство позволяет экспериментально определять потери на трение при холостом ходе машины и считать их равными потерям на трение при полной нагрузке.

Второе положение, касающееся зависимости потерь p_r от скорости, устанавливает, что потери на трение пропорциональны $v_z^{1,5}$, что легко получить, подставив в выражение (223) значение μ из (221).

На основании трех основных законов можем выразить коэффициент трения так:

$$\mu = \frac{k_R}{\theta_z} \sqrt{\frac{v_z}{q_z}}, \quad (224)$$

что будет верно для тихоходных машин ($v_z < 4$ м/сек). Для быстроходных имеем ($v_z > 10$ м/сек):

$$\mu = \frac{k'_R}{\theta_z q_z}. \quad (225)$$

По Деттмару (Dettmar) и Ляше (Lasche) имеем значения коэффициентов:

$$k_R = 2,65 \text{ и } k'_R = 2,0.$$

Подставляя эти значения в выражения (224) и (225) и заменяя значение μ в ур-нии (223), имеем для тихоходных машин:

$$p_r = \frac{26}{\theta_z} d_z l_z v_z^{1,5} \text{ ватт} \quad (226)$$

и для быстроходных:

$$p_r = \frac{20}{\theta_z} d_z l_z v_z \text{ ватт.} \quad (227)$$

Для шариковых и роликовых подшипников Хютте (Hütte) дает формулу:

$$p_r = 0,015 \frac{Q}{D} v_z \text{ (ватт)}, \quad (228)$$

где: D — диаметр круга, проведенного через середины шариков в сантиметрах, Q — полное давление на цапфу в килограммах.

Что касается потерь на трение вращающегося якоря и коллектора машины о воздух, а также вентиляционных потерь, которые обусловлены расходом мощности на приведение в движение вентилятора, встроенного в машину (машины с самовентиляцией), то последние можно вычислить по формуле:

$$p_v = 1,1 \cdot V v^3 \text{ ватт,} \quad (229)$$

где: V — объем воздуха, прогоняемого вентилятором, выраженный в $\text{м}^3/\text{сек}$, v — средняя скорость движения воздуха в $\text{м}/\text{сек}$.

Отметим, что величина V , в свою очередь, зависит линейно от v ; таким образом потери на вентилярование пропорциональны кубу скорости и достигают весьма значительной величины в быстроходных машинах.

Последняя составляющая механических потерь, а именно потери на трение щеток о коллектор, может быть выражена так:

$$p_B = 9,81 \mu_B q_B F_B v_k \text{ ватт,} \quad (230)$$

где: μ_B — коэффициент трения щеток о коллектор, q_B — удельное давление щетки о коллектор в $\text{кг}/\text{см}^2$, F_B — поверхность прилегания всех щеток к коллектору в см^2 , v_k — окружная скорость на коллекторе в $\text{м}/\text{сек}$.

Согласно данным Арнольда, имеем для угольных щеток:

$$q_B = 0,12 - 0,15 \text{ кг}/\text{см}^2 \text{ и } \mu_B = 0,20 - 0,03.$$

3. Магнитные потери.

а) Потери на гистерезис. Первая составляющая магнитных потерь — так называемые потери на гистерезис — вызвана в машинах постоянного тока перемагничиванием железа якоря. Величина этих потерь зависит, при прочих равных условиях, прежде всего от характера самого перемагничивания.

В сердечнике якоря имеем так называемое вращательное перемагничивание вследствие того, что каждый элемент железа сердечника, рассматриваемый как некоторый постоянный магнитик, стремится расположиться по направлению линий магнитного поля и, в связи с этим, изменяет свое направление, непрерывно вращаясь. Величина внешнего потока остается при этом неизменной.

На рис. 214 показаны последовательные положения (A_1, A_2, A_3, A_4) двух таких элементарных магнитиков: одного — расположенного у внешней поверхности якоря, и другого — у внутренней.

При вращении получается неизбежное запаздывание установления нужного положения элементарных магнитиков внутри железа вследствие внутреннего трения, что и проявляется в виде явления гистерезиса — запаздывания установления потока

в сердечнике по отношению к создающей его магнитодвижущей силе. Следствием внутреннего трения при перемагничивании является потеря на гистерезисе.

Иные условия перемагничивания будут иметь место в зубцах якоря. Здесь, вследствие быстрого перескакивания магнитных линий из зубца в зубец через пространство впадины, обладающей малой проницаемостью, имеем, по существу, пульсации потока, подобно тому, как это имеет место в трансформаторе. Поэтому здесь получается переменное перемагничивание.

Возможен, наконец, и третий случай перемагничивания — так называемое статическое перемагничивание, которое получается в случае медленного изменения намагничивающего тока в сторону повышения с последующим его уменьшением до нуля. Последнее имеет место, например, при снятии кривой намагничивания (характеристики холостого хода) машины.

Основная формула для расчета потерь на гистерезис была дана Штейнметцем в виде:

$$p_h' = \eta B_{\max}^{1,6} \text{ (эргов)}, \quad (231)$$

где: p_h' — потери на гистерезис за один цикл перемагничивания в 1 cm^3 железа, η — коэффициент Штейнметца, $B_{\max}$ — максимальное значение индукции.

Формула эта относилась к статическому и переменному перемагничиванию. Преобразуя ее, имеем:

$$p_h = \eta B_{\max}^{1,6} f \cdot 10^{-7} \text{ [W/cm}^3\text{]};$$

здесь f — частота перемагничивания в герцах; для 1 dm^3 получим:

$$p_h = \eta B_{\max}^{1,6} f \cdot 10^{-4} \text{ [W/dm}^3\text{]}. \quad (232)$$

Заметив, что $1000^{1,6} = 631 \cdot 10^2$, можем написать:

$$p_h = \eta \left(\frac{B_{\max}}{1000} \right)^{1,6} \cdot 631 \cdot 10^2 f \cdot 10^{-4} = (631 \eta) \frac{f}{100} \left(\frac{B_{\max}}{1000} \right)^{1,6} \text{ [W/dm}^3\text{]}. \quad (233)$$

Потери на гистерезис, отнесенные к единице веса, равны:

$$p_h = \frac{631 \eta}{7,7} \cdot \left(\frac{f}{100} \right) \left(\frac{B_{\max}}{1000} \right)^{1,6} \text{ [W/kg]}, \quad (234)$$

так как вес железа может быть принят $7,7 \text{ kg}$ на 1 dm^3 .

Как показал Фишер-Гиннен (Fischer-Hinnen), ф-ла (234) дает преуменьшенные значения потерь для индукций, больших $10\,000 \text{ G}$. Для таких индукций приходится вычислять потери на гистерезис по формуле:

$$p_h = \sigma_h \left(\frac{f}{100} \right) \left(\frac{B_{\max}}{10\,000} \right)^2 \text{ [W/kg]}, \quad (235)$$

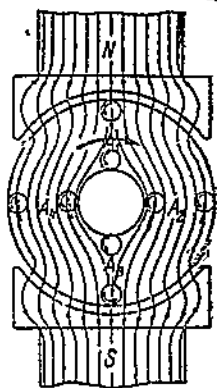


Рис. 214.

где

$$\sigma_h = \frac{631 \eta \cdot 10^{1,8}}{7,7} = 33 \cdot 10^2 \eta.$$

При этом предположено, что при $B_{\max} = 10\,000$ Г потери, определяемые ф-лами (234) и (235), должны быть равны.

Принимая, например,

$$\eta = 13,5 \cdot 10^{-4},$$

имеем:

$$\sigma_h = 4,4.$$

При $f = 50$ Hz и $B_{\max} = 10\,000$ Г, получим:

$$p_h = 4,4 \cdot 0,5 = 2,2 \text{ [W/kg]}.$$

Практически пользуются для вычисления потерь на гистерезис ф-лой (235), так как возведение в квадрат проще, чем в степень 1,6 и, кроме того, индукции, имеющие место в современных машинах, обычно лежат выше $10\,000$ Г.

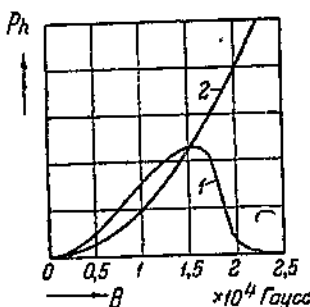


Рис. 215.

В случае применения ф-лы (235) к расчету потерь при вращательном перемагничивании сердечника якоря ведут расчет по той же ф-ле (235), вводя опытом полученный коэффициент 1,8. Необходимо отметить, что увеличение потерь от вращательного перемагничивания получается только для значений индукций меньших $18\,000$ Г. На рис. 215 приведены кривые зависимости потерь на гистерезис от индукции для случаев вращательного (кривая 1) и

переменного перемагничивания (кривая 2), пользуясь которыми, можно уточнить величину этих потерь.

Помимо увеличения гистерезисных потерь, вызванных вращательным перемагничиванием, имеем еще некоторое их увеличение вследствие штамповки железа, что ведет к закалке краев листа. Это увеличение можно учесть, введя для сердечника якоря коэффициент 1,1.

Для зубцов пользуемся непосредственно ур-нием (235), введя, однако, коэффициент 1,2, учитывающий также увеличение потерь вследствие штамповки железа. Индукция для расчета потерь в зубцах принимается в среднем сечении зубца, при этом берут ее действительное значение (B_{2D}).

б) Потери на токи Фуко и суммарные железные потери. В железе якоря машины при вращении его в магнитном поле индуктируются э. д. с. наподобие того, как это имеет место в проводниках обмотки. Благодаря тому, что якорь выполняется из отдельных листов, толщиной обычно $0,5$ мм, э. д. с., индуктированная в железе, создает токи, замыкающиеся по достаточно длинным путям, благодаря чему сами токи эти получаются небольшими. На рис. 216 показаны пути токов в якорь,

замыкающихся в отдельных листах железа. Якорь показан разрезанным на две части, причем верхняя часть снята совсем.

Однако, несмотря на все меры, направленные к уменьшению этих паразитных токов, они все же имеют место и вызывают потерю энергии, вследствие которой в железе выделяется тепло. Величина потерь мощности может быть найдена следующим образом.

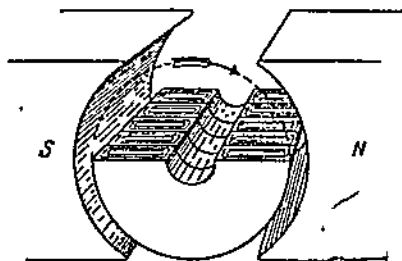


Рис. 216.

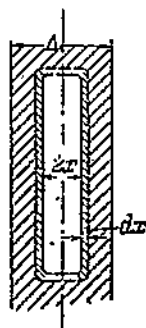


Рис. 217.

Выделим один лист железа толщиной Δ и изобразим его в сечении на рис. 217. Имеем действующее значение э. д. с., индуцированной в элементе листа dx , расположенном на расстоянии x от середины листа и имеющем длину в 1 см:

$$E_x = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} B_{\max} f \cdot x \cdot 10^{-8} \text{ вольт}^1). \quad (236)$$

В этой формуле

$$B_{\max} x = B_{\max} x \cdot 1 = \Phi_{\max}$$

есть, очевидно, поток, сцепленный с 1 см длины элемента.

Электродвижущая сила E_x дает ток в замкнутом контуре, показанном на рис. 217, причем сопротивление, приходящееся

¹⁾ Согласно закону индукции, имеем мгновенное значение э. д. с., индуцированной в проводнике потоком Φ :

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

Предполагая синусоидальное изменение потока, имеем:

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega t,$$

где: $\omega = 2\pi f$ — угловая частота изменения потока, t — время.

Дифференцируя, получим:

$$e = - \Phi_{\max} \omega \cos \omega t,$$

откуда максимальное значение э. д. с.:

$$E_{\max} = \Phi_{\max} \omega = 2\pi f \Phi_{\max}$$

а действующее значение:

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \Phi_{\max} 10^{-8} \text{ вольт}.$$

на 1 см длины этого контура, будет:

$$R_x = \rho_0 \frac{1}{dx \cdot 1} = \frac{\rho_0}{dx},$$

где ρ_0 — удельное сопротивление железа.

Ток в элементе шириной dx и глубиной в 1 см получится:

$$I_x = \frac{E_x}{\rho_0} dx.$$

Потеря от этого тока будет:

$$p_x = I_x^2 R_x = E_x^2 \frac{dx}{\rho_0}.$$

По всему сечению листа при глубине в 1 см будем иметь потерю:

$$p_z = 2 \int_0^{\Delta/2} E_x^2 \frac{dx}{\rho_0} = \frac{\pi^2}{6\rho_0} B_{\max}^2 f^2 \Delta^3 10^{-16} \text{ ватт.} \quad (237)$$

Потеря в 1 см³ получится, очевидно, если последнее выражение разделить на Δ . Имеем:

$$p_f = \frac{\pi^2}{6\rho_0} B_{\max}^2 f^2 \Delta^2 10^{-16} [\text{W/cm}^3].$$

Последнее выражение можно переписать следующим образом:

$$p_f = \frac{\pi^2}{6\rho 10^3} \left(\Delta \frac{f}{100} \cdot \frac{B_{\max}}{10000} \right)^2 [\text{W/cm}^3],$$

причем здесь $\rho = \rho_0 10^4$ выражено в омах на м/мм² и Δ — в мм.

Обозначив:

$$\sigma_f = \frac{\pi^2}{6\rho} \frac{\Delta^3 10^3}{7,7 10^3},$$

имеем потерю, отнесенную к единице веса:

$$p_f = \sigma_f \left(\frac{f}{100} \cdot \frac{B_{\max}}{10000} \right)^2 [\text{W/kg}]. \quad (238)$$

Принимая $\Delta = 0,5$ мм и $\rho = 0,1$ Ω , имеем:

$$\sigma_f = 5,35.$$

При $f = 50$ Hz и $B_{\max} = 10000$ G получим:

$$p_f = 5,35 \cdot 0,5^2 = 1,35 \text{ W/kg}.$$

Что касается индукции $B_{\max}$, то для зубцов попрежнему принимаем:

$$B_{\max} = B_{zD_0}.$$

При расчете потерь на токи Фуко в сердечнике якоря приходится, однако, увеличивать значение удельной потери p_f , считаясь с тем, что поле машины не синусоидально. Рихтер дает поправочный коэффициент, который лежит в пределах 1,25—2,0.

Кроме того, приходится считаться с увеличением токов Фуко, обусловленных неизбежными контактами между отдельными листами, получающимися при обработке впадин. Учитывая это увеличение коэффициентом 1,2, имеем окончательное увеличение потерь в 1,5—2,5 раза или, принимая среднее значение, вводим коэффициент 2.

Для вычисления потерь на токи Фуко в зубцах приходится этот коэффициент еще увеличивать, так как несовершенство обработки пазов сказывается на потерях в зубцах сильнее, чем на потерях в якоре. В среднем увеличение потерь для зубцов в три раза превышает значение, полученное по ф-ле (238).

Полная величина потерь на гистерезис и токи Фуко может быть, на основании сказанного, представлена так:

$$p_{Fe} = 2(p_{hz} + p_{fz})G_a + (1,2p_{hz} + 3p_{fz})G_z \quad (239)$$

Здесь: p_{Fe} — полная потеря в железе, G_a и G_z — веса (в kg) сердечника якоря и зубцов.

Индексы a и z соответствуют весу якоря и зубцам.

Отметим, что хотя для электрических машин и приходится вести расчет потерь на гистерезис и токи Фуко отдельно, разделяя их, кроме того, на части, соответствующие сердечнику якоря и зубцам, но практический магнитный материал часто характеризуют суммарной потерей на 1 kg. Эта цифра определяется при $B_{max} = 10\,000$ G и $f = 50$ Hz. Согласно предыдущему, удельная потеря

$$p_{Fe} = p_h + p_f = \sigma_h \frac{f}{100} + \sigma_f \left(\frac{f}{100}\right)^2 = \sigma_h \cdot 0,5 + \sigma_f \cdot 0,25.$$

Для принятых нами значений $\sigma_h = 4,4$ и $\sigma_f = 5,35$ получим:

$$p_{Fe} = 2,2 + 1,35 \cong 3,6 \text{ W/kg.}$$

Цифра эта несколько превышает данные табл. 4 для обыкновенного динамного железа (3,3 W/kg).

4. Потери на джоулев эффект.

а) Джоулевы потери в обмотке якоря. Ток якоря, проходя по обмотке его, создает джоулеву потерю, обусловленную тем, что обмотка имеет некоторое омическое сопротивление. В общем виде эта потеря может быть выражена формулой:

$$p_a = I_a^2 r_a \quad (240)$$

Сопротивление обмотки якоря r_a может быть выражено так:

$$r_a = \rho_a \frac{N l_a}{100} \frac{1}{2a} \frac{1}{2aq} \quad (241)$$

Первый множитель представляет собой длину (в m) всех N полувитков якоря при l_a — длине каждого из них (в cm).

Второй множитель учитывает то обстоятельство, что вся эта длина распределяется на $2a$ параллельных ветвей, благодаря чему сопротивление уменьшается в $2a$ раза.

Третий множитель учитывает уменьшение сопротивления вследствие того, что сечение меди q_a (mm²) одной параллельной ветви увеличивается по отношению к внешнему току I_a , отдаваемому машиной, в 2α раза.

Удельное сопротивление ρ может быть принято:

$$\rho_a = \frac{1}{57} [1 + 0,004 (\theta_a - 20)], \quad (242)$$

где θ_a — температура обмотки, $\frac{1}{57} = \rho_{a(20)}$ — удельное сопротивление при 20° C, 0,004 = α — температурный коэффициент.

Подставляя значение ρ_a в выражение (241), имеем:

$$r_a = \frac{N l_a [1 + 0,004 (\theta_a - 20)]}{(2a)^2 5700 q_a}. \quad (243)$$

В готовой машине величина r_a может быть измерена помощью вольтметра и амперметра.

В проектируемой машине ведем расчет сопротивления по ф-ле (243) и джоулевой потери — по ф-ле (240) для заданного тока I_a .

б) Джоулевы потери в последовательно с якорем включенных обмотках. Последовательно с якорем включаются обмотки: последовательная главных полюсов, обмотка дополнительных полюсов и компенсационная (если она имеется в данной машине). Джоулеву потерю для каждой из этих обмоток определяем по формуле:

$$p_s = I_s^2 R_s = I_s^2 \frac{w_s l_s [1 + 0,004 (\theta_s - 20)]}{5700 q_s}. \quad (244)$$

Для последовательной обмотки серийной машины:

$$I_s = I_a - I_r,$$

где I_r — ток в шунте (при шунтировании поля).

Для компаунд-машины имеем при длинном шунте:

$$I_s = I_a$$

и при коротком:

$$I_s = I_a - i_e,$$

где i_e — ток в параллельной обмотке.

Для обмотки компенсационной и дополнительных полюсов, а также для последовательной обмотки, при отсутствии шунтирования поля, имеем:

$$I_s = I_a.$$

Величины w_s — число витков обмотки, l_s — длина витка (см), q_s — сечение меди (mm²) принимаются, конечно, для той обмотки, для которой ведем вычисление потери p_s . То же касается и температуры θ_s .

с) Джоулевы потери в параллельной обмотке

возбуждения. Имеем сопротивление параллельной обмотки возбуждения:

$$R_e = \frac{w_e i_e [1 + 0,004 (\theta_e - 20)]}{5700 q_e} \quad (245)$$

Джоулевы потери в самой обмотке получаются:

$$p_e = i_e^2 R_e \quad (246)$$

Эти потери должны быть учтены в случае расчета нагревания машины.

При определении общих потерь в цепи возбуждения необходимо, однако, считаться с тем, что последовательно с обмоткой возбуждения всегда включается сопротивление r регулирующего реостата, а также (в случае независимого возбуждения) и сопротивление якоря возбуждателя.¹⁾ Полные потери:

$$p'_e = i_e^2 (R_e + r) \quad (247)$$

Эта же потеря может быть выражена следующим образом:

$$p'_e = U i_e \quad (248)$$

где U — напряжение на зажимах машины.

д) Потери в переходном слое между коллектором и щетками. Как было выяснено выше при рассмотрении различных типов щеток, применяемых в динамостроении, величина сопротивления переходного контакта между щеткой и коллектором зависит от ряда факторов и, в частности, от силы тока. Ввиду этого щетки характеризуют не удельным сопротивлением переходного слоя, а падением напряжения в этом слое, которое меняется при изменении силы тока меньше, чем сопротивление контакта.

В соответствии с этим при вычислении потерь лучше исходить из величины падения напряжения. Имеем:

$$p_B' = 2 I_a \Delta e_R \quad (249)$$

где Δe_R — падение напряжения.

Величина Δe_R зависит от сорта щеток и может лежать в пределах 0,6—1,5 В. Для расчетов принимают обычно

$$\Delta e_R = 1 \text{ В.}$$

Следует, кроме того, заметить, что величина Δe_R не остается постоянной и для некоторого определенного сорта щеток, а зависит, в первую очередь, от плотности тока i_B . На рис. 218 даны кривые зависимости $2e_R = f(i_B)$ для электрографитовых (ЭГ) щеток союзного производства, типов ЭГ-2 и ЭГ-4. Щетки эти обладают, как видно, значительным переходным падением на-

¹⁾ Потери в возбуждателя учитываются при определении коэффициента полезного действия машины лишь в том случае, если он соединен механически непосредственно с машиной.

пряжения при относительно невысоком коэффициенте трения [кривая $\mu = f(v_n)$].

Вычисление потерь по ф-ле (249) предполагает неизменную величину плотности тока в контактном слое, т. е. прямолинейную коммутацию.

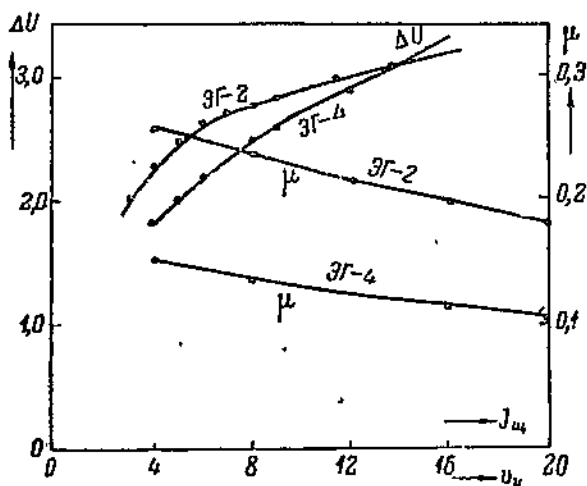


Рис. 218.

В случае криволинейной кривой перехода тока получается увеличение переходных потерь. Сводя поэтому соответствующий коэффициент, имеем:

$$p_B' = 2I_a \Delta e_R K_B, \quad (250)$$

где $K_B = 1,1 - 1,3$, согласно данным Арнольда.

5. Дополнительные потери.

Наиболее существенным фактором, обуславливающим появление добавочных потерь, является изменение тока якоря при коммутации.

Рассматривая процесс изменения тока в каждой секции якоря, видим, что после прохода под щеткой ток изменяет свое направление на прямо противоположное. В результате имеем изменение тока по трапеции, весьма близкой к прямоугольнику (рис. 219). Таким образом в секциях обмотки машины постоянного тока имеем, по существу, переменный ток. В соответствии с этим для машины постоянного тока приходится рассматривать уже не омическое сопротивление обмотки якоря, а активное сопротивление, которое всегда больше омического. Увеличение сопротивления вызывается токами Фуко, циркулирующими в меди обмотки. Индуцируются эти токи переменным полем, замыкающимся кругом проводника в момент коммутации. Таким образом коммутационные потери на токи Фуко являются по су-

пеству потерями, обусловленными наличием в обмотке якоря переменного тока.

Токи Фуко вызываются в обмотке якоря также вследствие неравномерного распределения поля в пазу якоря. В случае сильного насыщения оснований пазов часть линий выжимается во впадину подобно тому, как это изображено на рис. 220. Проводники обмотки располагаются при этом в неравномерном поле, вследствие чего по сечению их получается разность потенциалов, вызывающая паразитный ток.

Учитывая увеличение потерь, вызванное коммутацией тока, а также неравномерным полем паза, можно написать выражение для джоулевых потерь (240) так:

$$p_a = k_a I_a^2 r_a. \quad (251)$$

Однако дополнительные потери обуславливаются не только указанными двумя причинами. Они вызываются также: а) повышением местных индукций в зубцах вследствие искажения поля реакцией якоря, б) токами Фуко в стягивающих якорное железо болтах, в) возможными вибрациями вала и щеток, г) пульсациями потока под полюсными наконечниками вследствие зубчатого строения якоря.

Поэтому учитывают все дополнительные потери (p_d) вместе, считая (по ГОСТ 3887) их равными 1% номинальной мощности.

При изменении мощности ниже номинального значения принимают процент дополнительных потерь, изменяющийся пропорционально квадрату тока.

6. Коэффициент полезного действия.

Отношение отдаваемой машиной мощности P_2 к подводимой к ней мощности P_1 носит название коэффициента полезного действия (к. п. д.). Таким образом коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (252)$$

Часто к. п. д. выражают в процентах:

$$\eta^0 = \frac{P_2}{P_1} 100.$$

Для работы электрической машины генератором выражают эти мощности так:

$$P_2 = UI \text{ и } P_1 = UI + \Sigma p,$$

а для работы двигателем:

$$P_2 = UI - \Sigma p \text{ и } P_1 = UI.$$

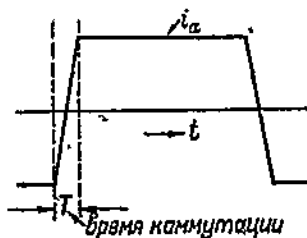


Рис. 219.

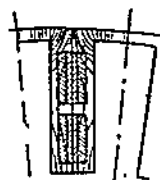


Рис. 220.

Таким образом все величины, входящие в формулу для к. п. д., выражают через электрическую мощность ввиду большего удобства и большей достижимой точности при ее измерениях.

В соответствии с этим имеем для генератора:

$$\eta_g = \frac{UI}{UI + \Sigma p} = 1 - \frac{\Sigma p}{UI + \Sigma p} \quad (253)$$

и для двигателя:

$$\eta_d = \frac{UI - \Sigma p}{UI} = 1 - \frac{\Sigma p}{UI}. \quad (254)$$

Ввиду относительно малой величины потерь, в особенности в больших машинах, лучше вести вычисление, пользуясь второй частью ф-ул (253) и (254).

Каждой нагрузке машины будет соответствовать свое значение к. п. д., так как при изменении UI меняется и сумма всех потерь (Σp).

Естественно, что наибольшее значение к. п. д. желательно иметь при той нагрузке, при которой машина работает большую часть времени. Для этого необходимо рассчитать машину соответствующим образом.

Для выяснения условия максимума к. п. д. анализируем, прежде всего, зависимость потерь от нагрузки машины. Для этого разбиваем все потери на три группы:

$$\left. \begin{aligned} p_0 &= p_r + p_o + p_B + p_{Fe} + p_e, \\ p_1 &= p'_B, \\ p_2 &= p_a + p_s + p_d. \end{aligned} \right\} \quad (255)$$

Все потери первой группы не меняются с изменением тока, отдаваемого машиной во внешнюю цепь.

Потери второй группы пропорциональны первой степени тока, см. ф-лу (250).

Потери третьей группы пропорциональны второй степени тока.

Вводя соответствующие коэффициенты пропорциональности, имеем:

$$\Sigma p = p_0 + p_1 + p_2 = p_0 + c_1 I + c_2 I^2. \quad (256)$$

Найдем теперь, при каком соотношении постоянных и переменных потерь к. п. д. будет иметь максимум. Берем производную от выражения (253) по току I , имеем:

$$\frac{d\eta}{dI} = \frac{U(UI + \Sigma p) - UI\left(U + \frac{d\Sigma p}{dI}\right)}{(UI + \Sigma p)^2}. \quad (257)$$

Приравнявая нулю, имеем условие максимума:

$$\Sigma p - I \frac{d\Sigma p}{dI} = 0. \quad (258)$$

Подставляя сюда значение Σp из выражения (256), получим:

$$p_0 + c_1 I + c_2 I^2 - c_1 I - 2c_2 I^2 = 0$$

$$\text{или} \quad p_0 = c_2 I^2, \quad (259)$$

что словами можно выразить так: коэффициент полезного действия получает свое наибольшее значение при такой нагрузке, когда постоянные потери равны переменным потерям, зависящим от квадрата тока.

Отсюда очевидно и то распределение потерь, которое необходимо установить в машине, предназначенной для тех или иных условий работы. Так, для получения наибольшего к. п. д. при полной нагрузке необходимо так распределить потери между переменной и постоянной частями их, чтобы равенство (259)

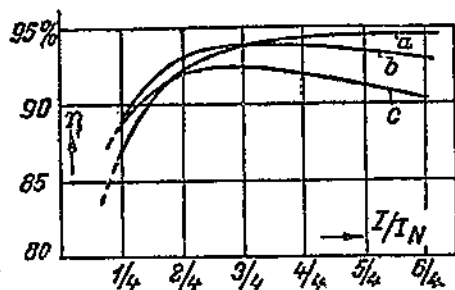


Рис. 221.

осуществлялось при номинальном значении тока. На рис. 221 даны три кривые к. п. д.

Кривая *a* дана для такого распределения потерь, когда:

$$\eta = \eta'_{\max} \text{ при } I = \frac{6}{4} I_N \text{ и } n = n_N.$$

Кривая *b* дана для $\eta = \eta''_{\max}$ при $I = \frac{3}{4} I_N$ и $n = \frac{1}{3} n_N$.

Кривая *c* дана для $\eta = \eta'''_{\max}$ при $I = \frac{5}{8} I_N$ и $n = \frac{1}{4} n_N$.

Здесь: n — число оборотов якоря в минуту, n_N — номинальное число оборотов.

Все три кривые даны для одной и той же машины, но при различной скорости ее вращения (т. е. при различной величине потерь p_0). Напряжение предположено неизменным, вследствие чего каждой скорости соответствует своя обмотка якоря.

В заключение приведем ряд данных, касающихся потерь и к. п. д. шунтового генератора, для ориентировки в относительной величине потерь, а также для суждения о значении к. п. д. и его изменении с нагрузкой.

Номинальная мощность 2000 kW.

Номинальное напряжение 500 V.

Номинальная скорость вращения 500 об/мин.

Потери распределяются в этой машине, при номинальной мощности, следующим образом.

Потери в железе: $p_{Fe} = 30 \text{ kW}$, или в процентах от номинальной мощности — $1,5\%$.

Потери на трение: $p_r + p_v = 25 \text{ kW}$, или в процентах от номинальной мощности — $1,25\%$.

Потери на трение в щетках: $p_B = 10 \text{ kW}$, или в процентах от номинальной мощности — $0,5\%$.

Потери на возбуждение: $p_e = 6 \text{ kW}$, или в процентах от номинальной мощности — $0,3\%$.

Потери холостого хода: $p_0 = 71 \text{ kW}$, или в процентах от номинальной мощности — $3,55\%$.

Потери на джоулев эффект в контакте щеток: $p_1 = p_{B'} = 8 \text{ kW}$, или в процентах от номинальной мощности — $0,4\%$.

Потери в якоре: $p_a = 20 \text{ kW}$, или в процентах от номинальной мощности — $1,0\%$.

Остальные джоулевы потери: $p_{sc} = p_{ck}^1) = 4 + 10 = 14 \text{ kW}$, — $0,7\%$.

Добавочные потери: $p_d = 9 \text{ kW}$, или в процентах от номинальной мощности — $0,45\%$.

Потери, зависящие от квадрата тока: $p_2 = 43 \text{ kW}$, или в процентах от номинальной мощности — $2,15\%$.

Значения мощностей, потерь и к. п. д. этой машины сведены в табл. 7.

ТАБЛИЦА 7.

$P_2 \text{ (kW)}$	$p_0 \text{ (kW)}$	$p_1 \text{ (kW)}$	$p_2 \text{ (kW)}$	$\Sigma p \text{ (kW)}$	$P_1 \text{ (kW)}$	η
500	71	2	2,7	75,7	575,7	0,869
1000	71	4	10,75	85,75	1085,75	0,920
1500	71	6	24,2	101,2	1601,2	0,938
2000	71	8	43	122	2122	0,943
3000	71	12	96,8	179,8	3179,8	0,945

ГЛАВА XI.

НАГРЕВАНИЕ И ОХЛАЖДЕНИЕ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА.

1. Проблема нагрева и охлаждения электрической машины.

Вредное влияние потерь энергии, переходящих в тепло в электрической машине, сказывается в повышении температуры отдельных частей ее над температурой окружающей среды.

Это повышение будет тем больше, чем больше потери машины, а также чем хуже идет отвод тепла с охлаждающих поверхностей.

¹⁾ p_{sc} — потеря на джоулев эффект в обмотке добавочных полюсов,
 p_{ck} — потеря на джоулев эффект в компенсационной обмотке.

Непосредственно после включения машины в сеть и отдачи ей тока, как генератором, или потребления тока, как двигателем, появляются неизбежные потери. Начинается повышение температуры машины, причем повышение это идет вначале быстро, так как при малой разнице в температуре частей машины и окружающей среды теплоотдача с поверхности машины (через теплопроводность, лучеиспускание и конвекцию) незначительна. Все выделяющееся тепло идет на повышение температуры.

По мере увеличения температуры растет, за счет большей разности температур, теплоотдача с поверхности, вследствие чего температура начинает повышаться медленнее.

В конце концов наступает тепловое равновесие, когда количество тепла, выделяющегося в машине в единицу времени, становится равным таковому же, отдаваемому с охлаждающих поверхностей окружающей среде. Конечные превышения температуры отдельных частей машины над температурой окружающей среды получаются при этом различными, в зависимости от величины потерь в данной части и охлаждающей поверхности ее, а также от условий омывания этой поверхности охлаждающей средой.

Эти конечные превышения не должны, однако, ни в коем случае превосходить тех безопасных пределов, которые установлены опытом для каждой из частей машины.

В самом деле, изоляционные материалы, которыми изолированы обмотки машины, как, например, хлопчатобумажная пряжа и ткань, выдерживают длительно температуру, не превышающую 80—95°. При переходе этого предела начинается обугливание изоляции, вследствие чего срок службы ее сильно сокращается. Чрезмерное повышение температуры ведет к быстрому выходу машины из строя вследствие сгорания изоляции.

Влияние чрезмерного повышения температуры сказывается не только на изоляции, но и на отдельных частях машины в целом. Так, например, коллектор может деформироваться вследствие чрезмерных напряжений, вызванных высокой температурой.

Ввиду сказанного наибольший интерес представляет установление допустимых пределов конечного превышения температуры, а также расчет предельных температур, могущих иметь место в проектируемой машине. Весьма большое значение имеет также вопрос об определении этих конечных температур в готовой машине при приемке-сдаче ее. Однако фиксация указанных температур, хотя и является конечной целью данного отдела, не должна заслонять собой другого, не менее важного положения.

Дело заключается в том, что, поскольку конечное превышение температуры зависит от величины потерь, эта последняя величина ограничивает и мощность машины, так как потери растут с увеличением электрической мощности, отдаваемой машиной (генератор) или забираемой ею (двигатель).

В результате, если при каком-либо значении мощности получилось повышение температуры хотя бы одной из частей машины, равное предельному допустимому значению, дальнейшее повышение мощности уже невозможно. Это обстоятельство заставляет принять за номинальную мощность машины такое ее значение, которое дает наибольшее превышение температур, близкое к предельному.¹⁾

Так как предельное повышение температуры машины зависит при данной величине потерь от величины охлаждающих поверхностей, а также от интенсивности отвода тепла с этих поверхностей, то очевидно, что мощность машины может быть поднята путем улучшения условий охлаждения. При помощи усиленной вентиляции машины можно значительно улучшить отвод тепла и повысить тем самым допустимую мощность.

Предел повышения мощности помощью усиленной вентиляции ставится значительным расходом энергии на приведение в движение вентилятора, а также образования вихрей и воздушных мешков при чрезмерной скорости вентилирующего воздуха. Применение водорода для охлаждения машины позволяет еще более повысить мощность машины, сохранив неизменными ее размеры.

Другой путь повышения мощности — это увеличение охлаждающих поверхностей, связанное с общим увеличением геометрических размеров машины. Это естественный путь, диктуемый в то же время необходимостью увеличения механической прочности машины при возрастании мощности, а также необходимостью получить удовлетворительные характеристики машины (изменение напряжения, изменение скорости вращения, кривую коэффициента полезного действия). На этот путь приходится становиться также и для того, чтобы обеспечить удовлетворительную коммутацию тока.

То очевидное обстоятельство, что большая по мощности электрическая машина должна иметь и большие геометрические размеры, имеет, таким образом, в своей основе целый ряд факторов, главнейшим из которых является необходимость отвода выделяющегося вследствие потерь тепла.

Отметим, что совсем недавно, когда применение дополнительных полюсов в машине постоянного тока еще не находило себе широкого распространения, мощность машины при данных ее габаритных размерах лимитировалась условиями коммутации тока. В настоящий момент пределом служат условия нагревания, так как удается добиться безискровой коммутации помощью дополнительных полюсов при всех значениях мощности, обуславливающих допустимый нагрев.

Из сказанного очевидна важность вопроса нагревания и охлаждения электрической машины, связанного с ее надежностью

¹⁾ Обычно на несколько градусов меньшее предельного в видах известного запаса; запас этот берут тем большим, чем больше мощность машины и ответственность ее.

и долговечностью работы, а также с экономичностью ее в отношении того количества материала, которое должно пойти на ее изготовление. Эта последняя величина, определяющая первоначальные затраты на машину, должна быть в то же время сопоставлена с величиной потерь энергии в машине, обуславливающих эксплуатационные расходы.

Возможно большая мощность машины при данных ее размерах, допустимые превышения температуры, высокий к. п. д. — вот те „противоположности“, которые приходится согласовывать при проектировании новой машины.

2. Допустимые температуры отдельных частей электрической машины и способы их измерения.

Ввиду того, что температура отдельных частей машины влияет, главным образом, на изоляционные материалы, приходится прежде всего установить безопасные для каждого сорта изоляции пределы температур. Этих пределов, однако, недостаточно для суждения о допустимом нагревании машины. Приходится, кроме наибольших температур, устанавливать наибольшие превышения температуры над температурой окружающей среды. При этом необходимо стандартизовать температуру окружающей среды, которая принята в наших нормах в 35°C для воздуха.

Дело в том, что определенное количество энергии, выделившееся в данной части машины, вызовет определенное превышение температуры этой части над окружающей средой. Температура же части будет всецело определяться также и температурой окружающей среды. Поэтому, если при температуре окружающей среды в 15°C получена при испытании установившаяся температура в 80°C , что, казалось бы, допустимо, то при температуре окружающей среды в 35°C установившаяся температура при той же нагрузке будет 100°C , что уже явилось бы недопустимым. Однако вполне возможно, что летом машине придется работать при температуре окружающей среды в 35°C . В это время машина перегреется и выйдет из строя.

Если же стандартизовать, кроме конечной температуры, еще и превышение ее, задав его таким, чтобы при наибольшей возможной температуре окружающей среды эта температура плюс превышение не превосходила допустимого предела, то получится полная гарантия, что предел никогда не будет превзойден.

Важно заметить, кроме того, что как предельная температура, так и превышение ее зависят от метода наблюдения. Ввиду этого в нормы введено понятие наибольшей наблюдаемой температуры, причем в каждом случае указан метод измерения.

Прежде чем привести нормы температур, необходимо классифицировать изоляционные материалы в отношении допускаемых для них наибольших температур нагрева. Имеем следующие четыре класса:

Класс О. Не пропитанные и не погруженные в масло волокнистые материалы, как-то: хлопчатобумажная пряжа и ткань, натуральный шелк, бумага и тому подобные органические вещества.

Класс А. Пропитанные или погруженные в масло волокнистые материалы, как-то: хлопчатобумажная пряжа и ткань, натуральный шелк, бумага и тому подобные органические вещества. К этому же классу относятся также эмалевые лаки, служащие для покрытия проводников.

Класс В. Препараты из слюды, асбеста и тому подобных материалов минерального происхождения со связующими веществами.

Класс С. Слюда без связующих материалов, фарфор, стекло, кварц и другие подобные материалы.

В соответствии с указанными классами изоляционных материалов имеем следующую таблицу наибольших наблюдаемых температур и наибольших превышений температуры (см. табл. 8).

Методы измерения температур, указанные в табл. 8, требуют особого пояснения.

Метод сопротивления заключается в том, что производят измерение сопротивления обмотки, превышение температуры которой над окружающей средой необходимо определить. Это измерение производят сначала в холодном состоянии; при этом получают сопротивление:

$$R_1 = R_{20} [1 + \alpha (\theta_1 - 20^\circ)],$$

где: R_{20} — сопротивление при 20°C , θ_1 — температура охлаждающей среды.

После длительной работы машины и окончательного установления температуры отдельных частей ее измеряют вновь сопротивление данной обмотки и получают:

$$R_2 = R_{20} [1 + \alpha (\theta_2 - 20^\circ)],$$

где θ_2 — температура обмотки в нагретом состоянии.

Относительное увеличение сопротивления будет:

$$\frac{R_2 - R_1}{R_1} = \frac{\alpha (\theta_2 - \theta_1)}{1 + \alpha (\theta_1 - 20^\circ)}.$$

Отсюда — превышение температуры:

$$\vartheta_m = \theta_2 - \theta_1 = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \left(\frac{1}{\alpha} + \theta_1 - 20 \right)$$

или, полагая

$$\alpha = \frac{1}{254,5},$$

имеем:

$$\vartheta_m = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (234,5 + \theta_1). \quad (260)$$

Отметим, что величина ϑ_m дает лишь среднее превышение температуры. Зная, кроме того, повышение температуры по-

ТАБЛИЦА 8.

№№ п/п	Класс изоляции	Наименование части машины или род обмотки	Наибольшее наблюдае- мые темпе- ратуры в °С	Наибольшее превышения температур в °С	Метод из- мерения
1	Класс О		80°	45°	Метод со- противле- ния с про- веркой по методу тер- мометра
2	Класс А		95°	60°	
3	Класс В		115°	80°	
4	Класс С	Все обмотки на вра- щающихся и неподвиж- ных частях машины, за исключением п. 5, 6, 7	Ограничены таким на- гревом, при котором температура соседних изолированных частей, а также превышение температуры не пре- восходят указанных для них пределов		
5	Классы О, А, В	Изолированные, по- стоянно замкнутые на- коротко обмотки	На 5° выше, чем в п. 1, 2, 3		Метод тер- мометра
6	Без изо- ляции	Постоянно замкнутые накоротко обмотки	Как и в п. 4		Метод тер- мометра
7	Все клас- сы	Однорядные обмотки возбуждения с голой неизолированной по- верхностью	На 5° выше, чем в п. 1, 2, 3		Как п. 1—4
8		Железо, не соприка- сающаяся с обмотками	Как и в п. 4		Метод тер- мометра
9		Железо с уложенны- ми в нем обмотками	Как и в п. 1, 2, 3, 4		
10		Коллектор и контакт- ные кольца	95°	60°	То же
11		Подшипники	80°	45°	"
12		Все другие части	Как и в п. 4		"

верхности обмотки ϑ_0 , измеренное термометром, можно опреде-
лить наибольшее превышение $\vartheta_{\max}$ по формуле Видмара:

$$\vartheta_{\max} = 2\vartheta_m - \vartheta_0. \quad (261)$$

Метод детекторов является в настоящее время одним
из наиболее распространенных. Он заключается в том, что в ту
часть машины, превышение температуры которой необходимо
измерить (например в паз, в железо между листами), заклады-
вают терморпару, соединенную с гальванометром. Этот последний

может быть градуирован прямо на превышение температуры в градусах С. Измерение температуры может вестись в течение всего опыта нагревания, причем получают непосредственное превышение температуры той части, с которой соприкасается термopapa. Ввиду этого нормы и предусматривают повышение наибольших температур на 5°C сверх норм, установленных для метода сопротивления. В качестве детектора может быть использован также детектор сопротивления.

Метод термометра элементарно прост и заключается обычно в измерении температуры железа, обмотки и подшипников помощью спиртового или ртутного термометра. Термометр должен быть плотно приложен к тому месту машины, температуру которого желательно измерить. Для улучшения передачи тепла от машины к термометру шарик последнего обертывают хорошо проводящим тепло материалом, часто фольгой. С наружной стороны шарик термометра покрывают, наоборот, плохо проводящим тепло материалом — ватой или войлоком.

Ввиду того, что термометр дает лишь температуру на поверхности, рекомендуется всегда применять его, где это представляется возможным, совместно с каким-либо другим методом, например измерением сопротивления обмотки.

3. Теория нагревания и ее практическое применение в условиях испытания машины на нагрев.

Нагревание отдельных частей электрической машины может быть с известным приближением рассмотрено так же, как равномерное нагревание идеального однородного твердого тела. Понятие „идеального“ предполагает здесь вполне равномерный нагрев тела, отсутствие перепада температур, т. е. мгновенную передачу внутренних температур наружным частям, а также одинаковое рассеивание тепла с поверхности тела.

Обозначим через:

Q — количество тепла, каждую секунду выделяющееся в теле, выраженное в больших калориях,

t — время в секундах,

O — поверхность тела в cm^2 ,

α — коэффициент рассеивания тепла, т. е. количество тепла в больших калориях, каждую секунду рассеиваемое с 1 cm^2 боковой поверхности тела при превышении температуры поверхности над температурой окружающей среды на 1°C ,

ϑ — превышение температуры тела над температурой окружающей среды в градусах С,

G — вес тела в килограммах,

c — удельная теплоемкость тела, т. е. количество тепла в больших калориях, необходимое для нагревания 1 kg данного тела на 1°C .

Тогда уравнение теплового баланса получится:

$$Qdt = O\alpha\vartheta dt + Gcd\vartheta. \quad (262)$$

Это уравнение означает, что количество тепла, выделяющееся в теле за элемент времени dt , идет на повышение температуры и на рассеивание тепла с поверхности тела в окружающую среду.

При неизменной величине выделяющегося в теле тепла Q , что, например, имеет место при неизменной нагрузке электрической машины, ур-ние (262) по истечении некоторого промежутка времени от момента начала нагревания перейдет в такое:

$$Q = Gc\vartheta_m, \quad (263)$$

где ϑ_m — установившееся значение превышения температуры тела над температурой окружающей среды.

Произойдет это потому, что член ур-ния (262), учитывающий рассеяние тепла, быстро возрастает с увеличением температуры ϑ , будучи ей пропорционален. В результате рассеяние тепла станет равным количеству тепла, выделяемому в теле, и дальнейшее повышение температуры прекратится; наступит установившийся тепловой режим, характеризуемый ур-нием (263). Из него имеем конечное превышение температуры:

$$\vartheta_m = \frac{Q}{Gc}, \quad (264)$$

после чего общее уравнение (262) может быть представлено так:

$$Q\left(1 - \frac{\vartheta}{\vartheta_m}\right)dt = Gc d\vartheta \quad (265)$$

или

$$\frac{d\vartheta}{\vartheta_m - \vartheta} = \frac{Q}{Gc\vartheta_m} dt. \quad (266)$$

Ввиду того что Q , G , c и ϑ_m — постоянные величины для данного тела при заданном количестве тепла Q , величина

$$\frac{Q}{Gc\vartheta_m} = \frac{1}{T} \quad (267)$$

также постоянная, причем T имеет определенный физический смысл. Перепишем ур-ние (267) так:

$$QT = Gc\vartheta_m.$$

Отсюда видим, что T есть время, в течение которого тело нагрелось бы до установившейся температуры ϑ_m , если бы не было никакого рассеивания тепла с его поверхности. Величина T носит название постоянной времени.

Вводя эту последнюю величину в ур-ние (266), имеем:

$$\frac{d\vartheta}{\vartheta_m - \vartheta} = \frac{dt}{T}. \quad (268)$$

Интегрируя это уравнение, получим:

$$t = -T \ln (\vartheta_m - \vartheta) + C. \quad (269)$$

Положим, что при $t=0$ температура тела выше температуры окружающей среды на ϑ_0 . Тогда:

$$C = T \ln (\vartheta_m - \vartheta_0). \quad (270)$$

Подставляя значение C в ур-ние (269), найдем:

$$t = -T \ln (\vartheta_m - \vartheta) + T \ln (\vartheta_m - \vartheta_0). \quad (271)$$

Откуда, после преобразования получим:

$$\frac{t}{T} = \ln \frac{\vartheta_m - \vartheta_0}{\vartheta_m - \vartheta} \quad (272)$$

или, вводя основание натуральных логарифмов e ,

$$e^{-\frac{t}{T}} = \frac{\vartheta_m - \vartheta_0}{\vartheta_m - \vartheta}. \quad (273)$$

Решая последнее уравнение относительно ϑ , будем иметь:

$$\vartheta = \vartheta_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \vartheta_0 e^{-\frac{t}{T}}. \quad (274)$$

При $\vartheta_0=0$ получим более простое уравнение:

$$\vartheta = \vartheta_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right). \quad (275)$$

Уравнения (274) и (275) определяют закон изменения температуры тела ϑ в зависимости от времени. Первое из них предполагает, что нагревание тела начинается тогда, когда температура его уже превышает температуру окружающей среды на ϑ_0 ; второе предполагает начало нагревания при равенстве температуры тела температуре окружающей среды. В обоих случаях имеем, однако, один и тот же закон изменения ϑ , различны лишь начальные ординаты (см. кривые рис. 222).

Кривые $\vartheta=f(t)$, определяемые указанными уравнениями, могут быть получены экспериментальным путем для электрической машины. Опыт нагревания машины, т. е. опыт, при котором замеряют температуры основных ее частей, начинают обычно с холодного состояния машины $\vartheta_0=0$, ввиду чего особое значение приобретает ур-ние (275).

Выясним некоторые свойства кривой, определяемой этим последним уравнением, чтобы распространить их затем на экспериментально снятые кривые. Возьмем производную по времени t от выражения (275). Тогда уравнение касательной к кривой:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{\vartheta_m}{T} e^{-\frac{t}{T}}. \quad (276)$$

При $t=0$ получим:

$$\left(\frac{d\vartheta}{dt}\right)_{t=0} = \frac{\vartheta_m}{T} = \operatorname{tg} \gamma. \quad (277)$$

Отсюда следует, что постоянная времени T может быть определена, если провести касательную к кривой в начале координат и

продолжить эту касательную до пересечения с прямой, параллельной оси абсцисс, проведенной на расстоянии от этой оси, равном наибольшему превышению температуры ϑ_m (рис. 223).

Знание постоянной времени совершенно необходимо для суждения о свойствах электрической машины в отношении ее нагрева и охлаждения.

Прежде всего постоянная времени позволяет установить необходимую продолжительность опыта нагревания, поставленного с целью определения конечных установившихся температур.

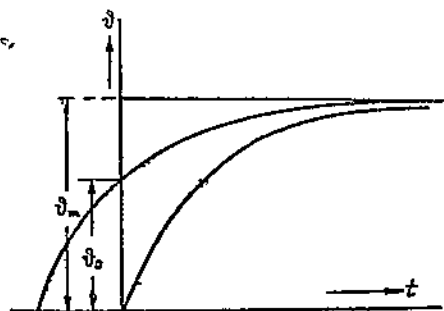


Рис. 222.

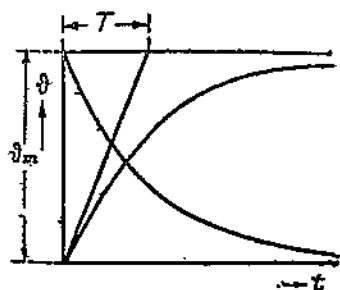


Рис. 223.

Задавая времени t различные значения, кратные T , можем определить из ур-ния (275) соответствующие значения отношения $\frac{\vartheta}{\vartheta_m}$. Так, например, приняв:

$$t = 4T,$$

получим

$$\frac{\vartheta}{\vartheta_m} = 0,982.$$

Отсюда очевидно, что продолжительность опыта нагревания не должна быть больше $t = 4T$, так как ошибка наблюдения будет лежать в пределах данного отклонения ϑ от ϑ_m .

Далее, постоянная времени дает возможность легко установить возможное повышение потерь, а следовательно, и мощности машины в случае перемежающейся нагрузки, как это покажем в дальнейшем.

Свойства кривой нагревания согласно ур-нию (275) дают также возможность установить конечную температуру тела, если известен снятый опытным путем отрезок кривой нагревания. Поэтому продолжительность опыта нагрева может быть меньше $4T$, что важно в особенности в больших машинах, где время T велико.

Из ур-ния (276) имеем:

$$\vartheta_m e^{-\frac{t}{T}} = T \frac{d\vartheta}{dt}.$$

Подставляя это выражение в (275), получим:

$$\vartheta = \vartheta_m - T \frac{d\vartheta}{dt}, \quad (278)$$

откуда очевидно, что между ϑ и $\frac{d\vartheta}{dt}$ существует линейная зависимость, которой можно воспользоваться для определения ϑ_m . Для этого переходим к конечным приращениям температуры, полагая:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{\Delta\vartheta}{\Delta t},$$

если Δt достаточно мало.

Откладывая на рис. 224 снятую экспериментально кривую нагревания, проводим, на достаточно малых одинаковых рас-

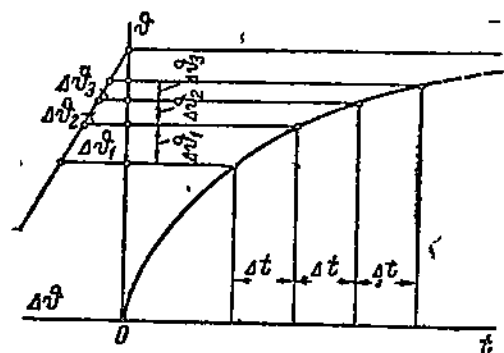


Рис. 224.

стояниях Δt друг от друга, ряд ординат. Затем определяем соответствующие этим ординатам приращения температуры $\Delta\vartheta_1, \Delta\vartheta_2, \Delta\vartheta_3$ и т. д. и строим прямую приращений в функции от начальной температуры данного промежутка Δt . Эта прямая может быть построена на том же чертеже слева. Продолжая прямую приращений до пересечения с осью

ординат, находим конечную установившуюся температуру.

Данный способ определения ϑ_m рекомендован нормами для машин средней и большой мощности. Опыт нагревания может быть закончен при этом по достижении машиной превышения температуры, равного 85—90% от предполагаемого конечного повышения. Отрезки Δt можно брать порядка 10—15 минут.

4. Теория охлаждения машины и метод определения температуры в момент выключения машины.

Уравнение охлаждения твердого тела получим из ур-ния (262), положив:

$$Q = 0,$$

так как в этом случае предполагается, что подвода тепла больше нет. Имеем:

$$O \vartheta dt + Gc d\vartheta = 0. \quad (279)$$

Преобразовывая это уравнение и принимая во внимание (267) и (264), получим:

$$\vartheta dt = - \frac{Gc}{O\alpha} d\vartheta = - T d\vartheta, \quad (280)$$

что дает после разделения переменных:

$$\frac{d\vartheta}{\vartheta} = -\frac{dt}{T}. \quad (281)$$

Интегрируя, имеем:

$$\ln \vartheta = -\frac{t}{T} + C. \quad (282)$$

Полагая, что при $t=0$ (момент выключения) $\vartheta = \vartheta_m$, имеем:

$$\ln \vartheta = -\frac{t}{T} + \ln \vartheta_m, \quad (283)$$

откуда после преобразования получим:

$$\vartheta = \vartheta_m e^{-\frac{t}{T}}. \quad (284)$$

На рис. 225 нанесена кривая охлаждения согласно ур-нию (284). Из сопоставления ур-ний (284) и (275) видно, что кривая охлаждения представляет зеркальное изображение кривой нагревания, повернутой относительно оси, проведенной на расстоянии $\frac{\vartheta_m}{2}$ от оси абсцисс.

Полагая, как и в случае опыта нагревания, что охлаждение частей машины постоянного тока происходит по тому же закону, как однородного твердого тела, можем воспользоваться свойствами кривой охлаждения для практических целей.

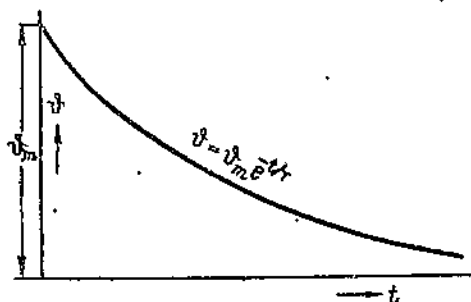


Рис. 225.

Предположим, что нам необходимо измерить конечную температуру обмотки якоря методом сопротивления. Последнее может быть сделано лишь после остановки машины. Для измерения сопротивления необходимо пропустить через якорь ток от какого-либо источника (например аккумуляторной батареи) и измерить как силу этого тока, так и падение напряжения в якоре. Присоединение всей измерительной цепи к якору требует известного времени, между тем якорь очень быстро охлаждается. Поэтому сопротивление его, измеренное через промежуток времени, необходимый для присоединения приборов, будет отличаться от сопротивления его, соответствующего моменту остановки машины.

Чтобы установить значение этого последнего сопротивления или, вернее, температуру, соответствующую ему, поступаем так.

Начиная с момента остановки машины, ведем отсчет времени. Снимаем затем показания приборов цепи, служащей для измерения сопротивления якоря, и устанавливаем превышение тем-

температуры. Опыт продолжаем некоторое время, производя отсчеты как времени, так и сопротивлений. Затем определяем все превышения температуры и строим кривую охлаждения согласно рис. 226. Легко доказать, что падения температуры за равные промежутки времени Δt зависят линейно от ϑ .

Откладывая эти падения влево от оси абсцисс и соединяя их прямой линией, получим в пересечении этой прямой с отрезком $1-B$, проведенным из точки 1 параллельно линиям $2-1'$, $3-2'$, $4-3'$, температуру якоря в момент выключения машины. То же может

быть сделано и для любой другой части машины, как, например, подшипников, обмоток возбуждения, железа якоря.

5. Основные режимы работы электрических машин, их классификация и особенности с точки зрения нагрева.

Рассмотрение нагревания электрической машины

мы ведем до сих пор в предположении, что в машине выделяется, вследствие неизбежных потерь, некоторое постоянное количество тепла. Режим работы машины был принят установившимся. Нагрузка оставалась неизменной. В этом случае очевидно, что конечное превышение температуры частей машины (264)

$$\vartheta_m = \frac{Q}{\alpha}$$

зависит лишь от величины потерь Q , т. е. от нагрузки машины. Это конечное превышение будет, однако, достигнуто не сразу, а по истечении некоторого, более или менее продолжительного промежутка времени, измеряемого обычно несколькими часами. Таким образом, чтобы температура достигла установившегося значения ϑ_m , машина должна проработать значительное время при неизменной нагрузке. В этом случае имеем дело с так называемой продолжительной работой машины, при которой рабочий период настолько велик, что нагрев машины достигает своего установившегося состояния. Естественно при этом считать за номинальную нагрузку то ее значение, которое дает ϑ_m , не превышающее норм.

Возможны, однако, и иные условия работы машины.

Так, например, если в период работы температура машин не достигает установившегося состояния и периоды работы чередуются с периодами остановки машины, столь значительными, что при возобновлении работы температура машины не

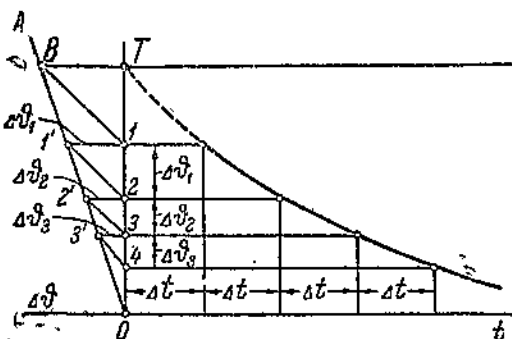


Рис. 226.

отличается от температуры охлаждающей среды, то имеем дело с кратковременной работой машины.

В этом случае, допуская то же конечное превышение температуры, не превосходящее норм, что и в случае продолжительной работы, можем повысить загрузку машины.

Превышение температуры при продолжительной работе:

$$\vartheta_m = \frac{Q}{O\alpha}.$$

Допуская при кратковременной работе в k' раз большую нагрузку, будем иметь конечное превышение температуры:

$$\vartheta'_m = \frac{Qk'}{O\alpha} = \vartheta_{mk}.$$

Новое уравнение нагревания будет:

$$\vartheta = \vartheta_m k' \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right).$$

Полагая, что допущенное превышение $\vartheta = \vartheta_m$, получим уравнение для определения k' :

$$\vartheta_m = \vartheta_m k' \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right).$$

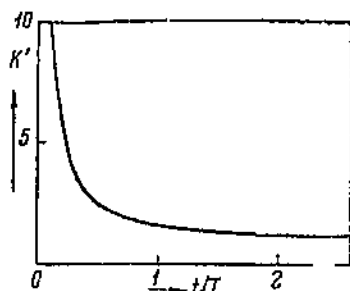


Рис. 227.

Допустимое значение увеличения потерь будет:

$$k' = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t}{T}}}. \quad (285)$$

Давая времени t ряд значений, получим для каждой продолжительности включения допустимое повышение потерь. На рис. 227 дана кривая $k' = f(t/T)$.

Как видно, в случае малой продолжительности нагрузки возможно значительное повышение потерь и мощности машины. Необходимо, однако, в этом случае считаться с условиями коммутации тока и возможностью поддержать напряжение на генераторах. Для электродвигателей вопрос коммутации тока также является в этом случае существенным. Кроме того, необходимо считаться с наибольшим вращающим моментом, который двигатель в состоянии развить. Момент при кратковременной работе и перегрузке двигателя не должен быть слишком близок к предельному моменту, чтобы была обеспечена достаточная устойчивость работы машины.

Практически значительно чаще кратковременной работы встречается случай так называемой повторно-кратковременной работы.

Повторно-кратковременной работой называется такая работа, при которой рабочие периоды регулярно чередуются с периодами остановки или работы без нагрузки — промежутками (например двигатели для кранов, подъемных машин и т. п.).

Общая продолжительность одного рабочего периода с одним промежутком не должна превосходить 10 минут.

Режим повторно-кратковременной работы характеризуется относительной продолжительностью рабочего периода, под которой понимается отношение времени рабочего периода к суммарной продолжительности рабочего периода и промежутка.

Нормальными значениями относительной продолжительности рабочего периода считаются 15, 25 и 40%.

Номинальной мощностью машины при повторно-кратковременной работе называется мощность, при которой машина работает длительно при регулярном чередовании рабочих периодов с промежутками при заданной относительной продолжительности рабочего периода. При этом наибольшие температуры и

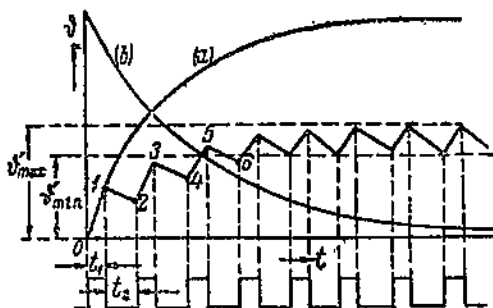


Рис. 228.

превышения температуры не должны превосходить указанных в нормах пределов.

Условия нагревания машины при повторно-кратковременной нагрузке легче, чем при продолжительной нагрузке. Действительно, за периоды холостого хода или полной остановки машины она успевает несколько охладиться, и дальнейшее повышение температуры

идет уже с меньшей ее величины. Нагревание при повторно-кратковременной нагрузке наглядно иллюстрируют кривые рис. 228.

На этом рисунке показана кривая нагревания *a* при длительной нагрузке и определенных потерях Q — таких же, как в случае повторно-кратковременной нагрузки во время рабочего периода. Здесь же нанесена кривая *b*, характеризующая охлаждение машины после продолжительной работы ее с потерями Q . Пусть рабочий период машины длится t_1 секунд, а промежуток — t_2 секунд. Нанесем условно внизу диаграмму нагрузки с указанием времени работы и промежутков между рабочими периодами. За время первого рабочего периода температура машины возрастет по основной кривой нагревания до точки 1. Вслед за снятием нагрузки, в соответствии с концом рабочего периода, произойдет падение температуры по части основной кривой охлаждения; эту часть легко определить, передвинув кривую *b* параллельно оси абсцисс до пересечения ее с кривой *a* в точке 1. В точке 2 кривой охлаждения имеем повторное включение нагрузки и повышение температуры по отрезку 2—3 кривой *a*, которую опять-таки, для построения отрезка 2—3, надлежит передвинуть параллельно оси абсцисс до совпадения одной из ее точек с точкой 2. По окончании рабочего периода вновь происходит охлаждение машины по кривой *b*.

В результате построения такой кривой для целого ряда рабочих периодов и промежутков между ними получим ступенчатую кривую нагревания машины при повторно-кратковременной нагрузке. Как видно, наибольшее значение, которого достигнет превышение температуры в этом случае, будет всегда меньше превышения температуры в случае продолжительной нагрузки.

По истечении некоторого, достаточно длительного промежутка времени превышение температуры будет колебаться между двумя ее значениями $\vartheta''_{\max}$ и $\vartheta''_{\min}$, значительно, впрочем, меньшими, чем конечное превышение при тех же потерях и продолжительном режиме работы.

Коэффициент k'' , характеризующий допустимое увеличение потерь при повторно-кратковременной нагрузке по сравнению с продолжительной нагрузкой, получим на основании рассуждений несколько более сложных, чем при определении коэффициента k' для кратковременной нагрузки. Не вдаваясь в суть вывода, ¹⁾ дадим окончательный результат:

$$k'' = \frac{1 - e^{-\frac{t_1}{T_0}}}{1 - e^{-\frac{t_1}{T}}}, \quad (286)$$

где: t_1 — продолжительность рабочего периода, t_2 — продолжительность паузы, $\epsilon = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \frac{T}{T_0}$ — приведенная продолжительность

включения, T_0 — постоянная времени машины при ее неподвижном состоянии ($T_0 > T$, так как условия охлаждения при неподвижной машине ухудшаются).

Итак, в случае повторно-кратковременной нагрузки возможно также некоторое увеличение потерь, а следовательно, и мощности машины. Это увеличение потерь может быть найдено по ф-ле (286) или же определено графическим путем построения кривых рис. 228, определения из них предельной температуры $\vartheta''_{\max}$ и определения отношения:

$$\frac{\vartheta_{\max}}{\vartheta'_{\max}} = k'',$$

где $\vartheta_{\max}$ есть превышение температуры при тех же потерях и продолжительной работе машины.

Существуют определенные типы электрических машин, специально предназначенные для кратковременной или повторно-кратковременной работы. В этом случае та мощность, которая является номинальной для данного типа работы машины, указывается и на щитке в качестве номинальной мощности машины. При этом, однако, на том же щитке всегда должна быть дополнительная надпись „в течение, минут“ для кратко-

¹⁾ См. В. К. Попов. Применение электродвигателей в промышленности, гл. II, § 20, стр. 76—78.

временной работы и „при повторно-кратковременной работе“ для типа работы того же наименования. В последнем случае должна быть обозначена также относительная продолжительность рабочего периода.

На надписи эти надлежит обращать особое внимание, чтобы не поставить случайно машину, предназначенную для кратковременной нагрузки, в условия продолжительной, без снижения номинальной мощности. Машина неизбежно при этом перегреется и выйдет из строя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Иностранные книги и журнальные статьи.

1. Arnold u. La Cour, Die Gleichstrommaschine, J. Springer, 1919 (имеется русский перевод, Москва, 1931).
2. Cohn, A., Zeitlupenstudien an Luftschaltern und an einem Gleichstrom-Generator bei kollektorrundfeuer, A. E. G. Mitt. 1930, H. 2, S. 180.
3. Heinreich, Die Bürstenproblem im Elektromaschinenbau, Berlin, 1929 (имеется русский перевод, Энепрониздат, 1933).
4. Liwschitz, M., Die Elektrischen Maschinen, Bd. I, Teubner, 1926.
5. Liwschitz, M. u. Gloeckner, H., Die Elektrischen Maschinen, Bd. II, Teubner, 1931.
6. Liwschitz, M., Die Elektrischen Maschinen, Bd. III, Teubner, 1935.
7. Petersen, W., Entwicklung der Kräfteerzeugung und Kraftübertragung, ETZ, 1930, H. 4, S. 107.
8. Richter, R., Ankerwicklungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen, J. Springer, 1920 (имеется русский перевод, Энепрониздат, 1933).
9. Richter, R., Die Sammlung für Elektromaschinenbau im Elektrotechnischen Institut der Techn. Hochschule in Karlsruhe, ETZ, 1933, H. 52, S. 1255.
10. Richter, R., Elektrische Maschinen, Bd. I, J. Springer, 1924.
11. Rzieha, E., und Seidenner, J., Starkstromtechnik, Bd. 1, Ernst & S. 1930.
12. Thury R., Kraftübertragung auf grosse Entfernungen durch hochgespannten Gleichstrom, ETZ, 1930, H. 4, S. 114.
13. Trettin, C., Stromwendung und Dämpfung bei Gleichstrommaschinen Wiss. Veröff. a. d. Siemens-Konz 1933, S. 34.

II. Русские книги и журнальные статьи.

14. Алексеев, А. Е., Современные достижения в области электромашиностроения, ЛОБЭК, 1932.
15. Алексеев, А. Е., Конструкция электрических машин, КУБУЧ, 1935.
16. Касьянов, В. Т., Сварочный генератор с самовозбуждением, Электричество, 1930, № 14, стр. 591.
17. Касьянов, В. Т., Регулировка дополнительных полюсов машины постоянного тока, Электричество, 1934, № 20, стр. 1; 1935, № 1, стр. 45.
18. Костенко, М. П., Экспериментально практический анализ коммутации машин постоянного тока, „За единые серии электрических машин“, ОНТИ, 1936.
19. Курбатов, С. И., Динамомашинны и электродвигатели постоянного тока, ГНТИ, 1931.
20. Левитус, Лягушачья обмотка электрических машин, Электричество, 1932, № 17—18, стр. 836.
21. Москвитин, А. И., Скорость распространения кругового огня по коллектору, Электричество, 1933, № 9, стр. 27.
22. Москвитин, А. И., Круговой огонь на коллекторе и причины его возникновения, Электричество, 1932, № 17—18, стр. 829.
23. Петрунькин, Электрические генераторы и трансформаторы для дуговой сварки.
24. Пнотровский, Л. М., Испытания электрических машин постоянного тока, КУБУЧ, 1932.

25. Поной, В. К., Машины постоянного тока, КУВУЧ, 1932.
26. Сахаров, А. П., Конспект расчета машин постоянного тока, КУВУЧ, 1934.
27. Сергеев, П. С., Генераторы и двигатели постоянного тока, ГНТИ, 1931.
28. Толвинский, В. А., Электрические машины постоянного тока, КУВУЧ, 1929.
29. Толвинский, В. А. и Струнников, Ф. Ф., Экспериментальное исследование машины Розенберга, Электричество, 1928, № 9, стр. 429.
30. Усатый, С. И., Электрические машины, ОНТИ, 1932.
31. Хаккен, Н. А., и Еремеев, А. Н., Выполнение обмоток электрических машин, Энергоиздат, 1933.
32. Холуяков, Ф. И., Электрические машины постоянного тока, ГИЗ, 1931.
33. Шенфер, К. И., Динамомашины постоянного тока, Энергоиздат, 1932.
34. Электроэнергетика, Сборник общесоюзных стандартов, Стандартгиз, 1936.
-

ОГЛАВЛЕНИЕ.

Глава I. Введение в курс машин постоянного тока.

	Стр.
1. Принципы действия электрической машины постоянного тока и основные элементы ее	5
2. Развитие электрических машин постоянного тока и их современное состояние	15
3. Основные элементы конструктивного оформления машин постоянного тока	21

Глава II. Обмотки якоря машин постоянного тока.

1. Принципы выполнения барабанной обмотки	32
2. Простые параллельные обмотки якоря и их основные свойства	37
3. Множественно-параллельные обмотки	47
4. Простые последовательные обмотки	50
5. Множественно-последовательные обмотки	55
6. Условия симметрии обмоток и некоторые несимметричные обмотки	57
7. Уравнительные соединения	61
8. Некоторые специальные обмотки	70
9. Сравнение и выбор обмоток	74
10. Индуцированная в обмотке якоря электродвижущая сила и ее пульсации	76
11. Техническое выполнение обмоток	81

Глава III. Магнитная цепь и ее расчет.

1. Магнитная цепь и способы возбуждения	88
2. Магнитные материалы, применяемые в динамостроении	92
3. Обоснования расчета магнитной цепи	94
4. Определение ампервитков для проведения потока через отдельные части магнитной цепи	98
5. Кривая намагничивания и кривая поля машины при холостом ходе	111

Глава IV. Реакция якоря и расчет магнитной цепи при нагрузке.

1. Влияние тока в обмотке якоря на поле машины	114
2. Поле якоря и построение кривой результирующего поля. Окончательные выводы о влиянии поля якоря на поле полюсов и э. д. с. машины	119
3. Количественный учет влияния ампервитков якоря на магнитный поток и э. д. с. машины	122

	Стр.
Глава V. Собирающие ток с коллектора машины постоянного тока.	
1. Введение	127
2. Коммутация тока при отсутствии в короткозамкнутой секции э. д. с.	128
3. Коммутация тока в общем случае	132
4. Причины коммутационного искрения и критерий для без- исковой коммутации	142
5. Вычисление э. д. с. самоиндукции (реактивной э. д. с.)	145
6. Средства для улучшения коммутации	150
7. Искрение на коллекторе, круговой огонь и компенсационная обмотка	159
8. Щетки, применяемые в динамостроении	167
9. Кривые подпитки добавочных полюсов и настройка коммута- ции машины	171
Глава VI. Генераторы и их характеристики.	
1. Введение	176
2. Характеристики холостого хода и нагрузочные	177
3. Внешние характеристики, падение и повышение напряжения	179
4. Характеристики — регулировочная и короткого замыкания	182
5. Особенности характеристики шунтового генератора	184
6. Особенности характеристик серийного генератора	189
7. Особенности характеристик генератора со смешанным возбу- ждением	191
Глава VII. Особые свойства генераторов.	
1. Условия самовозбуждения	196
2. Параллельная работа шунтовых генераторов	199
3. Параллельная работа компаундных генераторов	203
4. Включение генератора на трехпроводную сеть	206
Глава VIII. Специальные типы генераторов.	
1. Машина Кремера для электрической сварки	209
2. Машина Розенберга для сварки и освещения поездов	211
3. Машина ГЕС для электрической сварки	216
Глава IX. Электродвигатели и их характеристики.	
1. Обратимость электрических машин	218
2. Особенности двигательного режима и основные уравнения	221
3. Пуск двигателей в ход	224
4. Характеристики двигателей постоянного тока	228
5. Регулирование скорости двигателей	232
Глава X. Потери энергии в машине постоянного тока и коэффициент полезного действия.	
1. Общие соображения и классификация потерь	245
2. Механические потери и их определение	246
3. Магнитные потери	250
4. Потери на джоулев эффект	255
5. Дополнительные потери	258
6. Коэффициент полезного действия	259

Глава XI. Нагревание и охлаждение машин постоянного тока.

1. Проблема нагревания и охлаждения электрической машины .	262
2. Допустимые температуры отдельных частей электрической машины и способы их измерения	265
3. Теория нагревания и ее практическое применение в условиях испытания машины на нагрев	268
4. Теория охлаждения машины и метод определения температуры в момент выключения машины	272
5. Основные режимы работы электрических машин, их классификация и особенности с точки зрения нагрева	274
Список литературы	279

Редактор *Л. Б. Ривлин.*

Техн. редактор *Л. В. Воронцовская.*

Индекс 99-20-5-2. Тираж 5 000. Сдано в набор 23/XI-37 г. Подп. в печ. 21/II-38 г.
Формат бумаги 62 X 92¹/₁₆. Уч.-авт. л. 16,6. Бум. л. 8⁷/₈. Печ. зн. в бум. л. 101 000.
Заказ № 1913. Леноблгорлит № 427. Выход в свет март 1938 г.

3-я тип. ОНТИ. Ленинград, ул. Моисеенко, 10.

ЗАМЕЧАТЕЛЬНЫЕ ОШЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть	По чьей вине
198	9—12 сверху	уклон меньше угла α_2 , отличный от основной пря- молинейной части угла α ,	уклон меньший (угол α_2), отличный от основной пря- молинейной части (угол α_1)	Автора

262	17 сверху	$p_{sc}=p_{sk}$	$p_{sc}+p_{sk}$	Редакции
-----	-----------	-----------------	-----------------	----------