

Проф. М. ВИДМАР

ТЕОРИЯ и РАБОТА
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
МАШИН



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

1 9 3 1

621.312

В 42

Депозитарий

Проф. М. ВИДМАР

7093

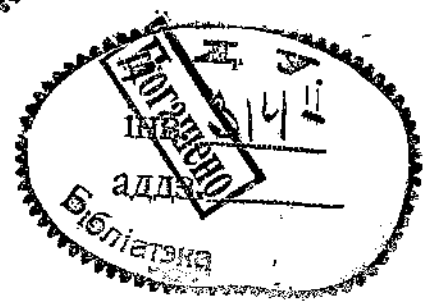
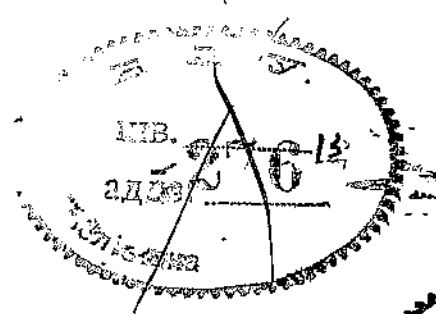
X

ТЕОРИЯ И РАБОТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

ПЕРЕВОД С НЕМЕЦКОГО
ИНЖ. Г. А. РИВКИНА

ПОД РЕДАКЦИЕЙ
ИНЖ. Е. В. НИТУСОВА

Издание второе



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1931 ЛЕНИНГРАД

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА

71409320

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Prof. MILAN VIDMAR

WIRKUNGSWEISE
ELEKTRISCHER MASCHINEN

Вып. 1.
Ленинградский Областной № 6823.

Зак. № 868. 1931 г. Кн. II.

ОГНЗ № 1111/М.
Тираж 7000 экз. 1931 г. л. 1.

8-я типография ОГНЗ РСФСР „Красный Печатник“. Ленинград, Международный пр., 75а.

ВН.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Теория электрических машин в настоящее время представляет собой настолько обширную область знания, что овладеть ею полностью почти не под силу одному человеку. Приходится поэтому различные электрические машины рассматривать в отдельных трудах.

Кроме того, вопросы эксплуатации, вопросы построения электрических машин и технико-экономические вопросы в свою очередь представляют собой самостоятельные отрасли теории. Даже весьма образованным инженерам очень трудно научить теорию электрических машин во всем ее объеме.

С другой стороны, весьма понятно, что учащиеся и начинающие, а также не работающие в области машиностроения инженеры-электрики, часто сталкиваются с вопросами построения электрических машин. Но они не имеют ни времени, ни сил полностью постигнуть теорию электрических машин. При перелистывании толстых, написанных для специалистов книг, они весьма быстро теряют нить, должествующую вести их по тайным лабиринтам теории электрических машин. Они не могут отличить существенного от деталей, физическое представление о работе машин пропадает.

Однако, совершенно необходимо, чтобы эксплуатационный инженер, монтажный инженер и даже инженер-связи знали, что происходит в машинах. Для них не имеют значения ни вопросы расчета машин, ни вопросы их построения. Физическое представление, знание принципов действия — вот, что должно остаться в памяти или, по крайней мере, быть достигнуто инженером-электриком.

В предлагаемой книге сделана попытка дать в сжатой форме принципы действия электрических машин. Насколько возможно, в настоящей книге избегаются расчеты, не приведено никаких деталей и преследуется цель дать только физическую картину.

Книга написана для учащихся и для инженер-электриков, не работающих за конструкторским столом; в ней оставлено только существенное, подчеркнута родственность различных видов электрических машин и ищется, прежде всего, ясная физическая картина работы идеальной электрической машины; эта картина лишь варьируется при описании отдельных разновидностей ее.

Несомненно, что для ясного представления о работе электрических машин в высшей степени важно знать, что, по существу, имеется одна единая электрическая машина. И трансформатор, и синхронная машина, и, наконец, коллекторные машины, представляют собой только варианты этой единой машины. Эта мысль проходит красной нитью через всю книгу.

в последней подчеркивается и доказывается происхождение всех видов электрических машин от трансформатора.

Теория электрических машин, построенная на едином принципе их действия, опирается на несколько основных законов электротехники и пользуется с большим успехом векторными диаграммами. Эта теория не требует большой предварительной подготовки, она весьма наглядна и дает возможность получить, хотя и в грубых чертах, но тем не менее верную картину.

Приходится начинать с обыкновенного трансформатора переменного тока, заблаговременно уяснив важность электрического и магнитного равновесия, а также указать на различие между трансформатором напряжения и трансформатором тока.

Наряду с электрическим трансформатором должен быть рассмотрен механизированный трансформатор для того, чтобы сразу была уяснена возможность электрической и механической работы магнитного потока. Механизирование трансформатора приводит к мысли об основной принципиальной модели вращающейся электрической машины, продолжающей оставаться, однако, трансформатором.

Таким образом, синхронная машина оказывается не чем иным, как механизированным трансформатором, а именно — трансформатором тока только с механизированной трансформацией. Асинхронная машина делает шаг вперед: она, трансформируя одновременно и механически и электрически, и представляет собой универсальный трансформатор.

Практически применяющиеся машины постоянного тока приводятся к вышеуказанной основной модели вращающихся электрических машин посредством введения в наше рассмотрение коллектора. Трудности коммутации электрического тока отражаются на усложнении представления принципов действия электрических машин.

Среднее положение между машинами постоянного и переменного тока занимает одноякорный преобразователь. Полной своей глубины проблема коммутации достигает у коллекторных машин переменного тока. Изложение заканчивается коллекторным мотором трехфазного тока.

В сжатом изложении принципов действия электрических машин нет места для описания машин специальных. О них, как и прочих многочисленных подробностях, нужно говорить в специальных книгах; эти подробности нарисованной несколькими штрихами картины должны отпасть. Они нужны лишь человеку, уже получившему впечатление и стремящемуся обозреть более обширные горизонты. В соответствии с задачей настоящей книги в ней приводятся лишь схематические эскизы, схемы и векторные диаграммы при подготовке которых мне была оказана существенная помощь моими ассистентами инж. I. Rudolf и инж. D. Matanovich.

Я буду считать, что не напрасно написал эту книгу, если мне удастся начинающему и неспециалисту дать безусловно необходимое ему краткое и отчетливое представление о такой обширной области электротехники, которая сама по себе в состоянии занять человека на протяжении всей его жизни.

М. Видмар.

Введение.

1. НАЗНАЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН. ЗАДАЧА ТЕОРИИ.

Электротехника оперирует напряжениями, вызывающими электрический ток. Роль разности высот верхнего и нижнего уровня воды в гидравлической установке играет в электрических цепях напряжение. Количеству воды, проходящему в единицу времени через турбину, соответствует сила тока.

Как без разности высот нельзя получить гидравлической энергии, так и без напряжений не могут существовать работающие электрические цепи. Могущие быть использованными разности высот нам дает сама природа, в то время как напряжения приходится создавать. Само собой разумеется, что получение необходимых напряжений является одной из важнейших проблем электротехники.

Из водных сил мы добываем энергию, которая в свою очередь должна была быть сообщена воде. Как это происходит, мы знаем. Солнце поднимает воду из морей, образует облака, с которых вода испадает на горы. Оно работает как чудовищный насос, неутомимо поддерживающий естественную циркуляцию воды.

Когда мы заставляем работать электрические цепи, мы также должны подводить энергию, чтобы затем ее преобразовать в электрическую. Мы должны непременно вздвигать высоко электроны, чтобы затем, для работы, они падали вниз, подобно потоку. Нам нужен насос, подобный солнцу, нам нужен электрический генератор.

Генератор — наиболее важная электрическая машина. Его назначение — преобразование механической энергии в электрическую. Он создает напряжение и поддерживает его. Генератор — сердце всякой электрической установки.

Мы знаем, что энергия легко меняет свою форму, что она одинаково легко переходит из механического вида в электрический, как и из электрического в механический. В виду этого не трудно перевернуть процесс работы генератора. Таким образом получается электрический мотор. Мотор также является машиной. Мы называем энергетической машиной всякий преобразователь энергии, длительно работающий, и на одной стороне которого находится механическая энергия.

Имеются, однако, электрические машины, не подходящие под это определение. Электрическая энергия сама по себе проявляется в различных формах, менять которые нам нужно уметь. Электрическая цепь, обладающая высоким напряжением и малой силой тока, может развивать такую же мощность, как цепь с малым напряжением и большим током.

Мы охотно используем энергию при малом напоре, но при большом количестве воды. Еще приятней для нас немногочисленные потоки с высоким падением. К сожалению, мы вынуждены пользоваться водяной силой в том виде, как она встречается в природе. В виду этого многие источники гидравлической энергии остаются неиспользованными. Однако то, что на нашем свете является невозможным — в мире электричества легко достигается. Трансформатор по нашему желанию преобразовывает электрическую энергию.

С полным правом мы считаем трансформатор также электрической машиной, хотя он и не имеет никакого механического привода. Он является таким же преобразователем электрической энергии, как генератор или мотор. Теория электрических машин, как мы увидим ниже, не может исключить из своего рассмотрения трансформатор. Все электрические машины являются своего рода трансформаторами. Существует, собственно говоря, только одна возможность создания напряжений — путем использования электромагнитной энергии. Электротехника, правда, начала с другого. Но теперь для длительной работы используется только напряжение, индуцируемое изменяющимся по времени магнитным потоком. Таким образом, во главу угла теории построения электрических машин нужно поставить закон электромагнитной индукции. Магнитный поток, содержащий Φ силовых линий, наводит в каждом охватывающем его проводнике напряжение E_i — если напряженность поля изменяется по времени; напряжение E_i пропорционально скорости убывания количества силовых линий. Если в элемент времени dt число силовых линий уменьшается на $d\Phi$, то

$$E_i = - \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \dots \dots \dots (1)$$

Всякая техническая электрическая цепь нуждается в длительном напряжении. В эксплуатации мы должны иметь возможность рабочее состояние машин повторять и сохранять его произвольно долго. Гальванические элементы поэтому для этой цели не годятся, так как они быстро расходуются. Нам нужно иметь непрерывный поток энергии, чтоб иметь возможность им непрерывно пользоваться.

Уравнение (1) приводит нас к мысли о непрерывно убывающем и неисчерпаемом магнитном потоке, так как мы имеем в виду создание длительного напряжения постоянной величины. Но подобный поток получить мы не в состоянии. С этой точки зрения закон электромагнитной индукции практических результатов не дает.

Мы должны прибегнуть к такому магнитному потоку, число силовых линий которого то возрастает, то убывает, т.-е. претерпевает колебания; интенсивность такого потока представляет собой периодическую функцию от времени. При этом, конечно, и величина наведенного напряжения будет также колебаться, периодически изменяясь во времени. Другого пути для получения длительного рабочего напряжения нет. Нам приходится допустить изменение величины рабочих факторов внутри одного периода. Зато мы имеем возможность заставлять такие одинаковые периоды следовать друг за другом произвольное число раз, создав таким образом нечто длительное, необходимое в жизни.

В этом заключается идея переменного тока, к которой нас неизменно приводит закон электромагнитной индукции. Вполне, однако, понятно, что нам ближе постоянный ток с его неизменным напряжением и постоянно одинаковой силой. То обстоятельство, что и постоянный ток и постоянные напряжения являются результатом применения закона индукции, что

машины постоянного тока строятся по тому же принципу, как машины переменного тока, — кажется непонятным и ни в коей мере не вытекает из уравнения (1).

Кристалльно чистый закон индукции, выраженный уравнением (1), мы будем встречать в теории электрических машин в различных его модификациях. По существу своему он представляет собой один из самых замечательных и таинственных законов физики. Построение электрических машин раскрыло многие его тайны, постигло многие его тонкости, и он стал краеугольным камнем громадного здания, каковое представляет собой теория электрических машин в ее современном развитии.

Строя машины как переменного, так и постоянного тока, мы, естественно, должны иногда строить машины, преобразовывающие постоянный ток в переменный и обратно. Эти преобразователи также являются машинами постольку, поскольку они служат для преобразования энергии. Механический привод для них является несущественным придатком.

Генератор, моторы, преобразователи и трансформаторы представляют собой разновидности электрических машин, имеющие каждая свою эксплуатационную задачу. Но за различным формами все же скрывается их единая сущность электрической машины.

Наиболее благодарная задача теории — дать общее описание принципа действия электрических машин, т.-е. нарисовать такую физическую картину, которая годилась бы для любой электрической машины и показала бы, что разные машины являются лишь отдельными модификациями. Лишь только после того, как правильно будет решена эта задача, легко будет понимать детали. Действительность показывает, что вполне возможно единообразно изложить основные свойства всех машин и тем самым создать для теории машин мощный остов. Оказывается возможным показать, что все формы исполнения являются лишь частными случаями, в которых отдельные свойства машины получили наибольшее развитие. Есть возможность дать ясный обзор всего электромашиностроения и тем самым помочь инженеру овладеть этой важнейшей отраслью электротехники.

Вполне понятно, что теорию электрических машин необходимо начать с элементарной картины. Такую картину дает трансформатор. Теорию последнего легко развить в теорию универсального трансформатора, охватывающую все электрические машины. Прорабатывая детали, мы узнаем принципы действия генераторов моторов и преобразователей. Самостоятельную ветвь этой теории представляют собой коллекторные машины.

I. Трансформатор.

2. ЗНАЧЕНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ. ТРАНСФОРМАТОР НАПРЯЖЕНИЯ. ТРАНСФОРМАТОР ТОКА.

В современных обширных электрических установках мы различаем три строго обособленных части. На месте нахождения естественного источника энергии—гидравлической энергии или месте нахождения запасов угля или нефти—сооружается устройство для получения электрической энергии. На большом или малом расстоянии от него находятся потребители—осветительные сети, заводы с электромоторами и т. п. Место производства энергии соединяют с местом ее потребления линии электропередач.

Потребителям нужно иметь низкое напряжение, например 220 вольт. Очевидно, что в жилища нельзя вводить опасного для жизни напряжения. Распределительные сети, поэтому, должны передавать большие токи и сохранять при этом предписанное низкое напряжение.

Дальняя электропередача не может работать при низком напряжении. С увеличением дальности передачи энергии возрастает и рабочее напряжение. В Европе работают уже с напряжением 220 000 вольт и недалеко от разрешения проблема электропередачи при напряжении 380 000 вольт.

Генераторы крупных установок не могут быть построены ни на низкое напряжение потребителей, ни на высокое напряжение электропередач. Электрические машины имеют свои особенности, рассмотреть которые необходимо. Таким образом возникает необходимость иметь в электрической установке еще третье напряжение; но и этого третьего напряжения зачастую бывает недостаточно и приходится прибегать к четвертому напряжению—для линий среднего напряжения между электропередачей и распределительной сетью, что облегчает проникновение электрического тока к разбросанным потребителям.

Поток энергии, направляясь от места его возникновения к потребителю, должен на этом пути претерпеть много превращений. При постоянной мощности, равной произведению силы тока на напряжение, меняются составляющие ее факторы. В этом заключается задача трансформатора. Легко усмотреть, что от работоспособности наших трансформаторов сильно зависит развитие крупных электрических установок. Чем выше мы можем поднять напряжение трансформаторов, тем дальше возможно будет передать энергию. Таким образом, трансформатор сам по себе содействует успехам техники сильных токов.

Нормальные установки работают при напряжении постоянной величины, не испытывающем сколько-нибудь значительных колебаний. Конечно, внутри одного периода напряжения переменного тока изменяется от своей

положительной амплитуды до отрицательной. Но на протяжении всего ряда периодов амплитуда остается неизменной. Можно сказать, что трансформаторы, практически, работают при неизменном напряжении.

Трансформатор напряжения, работающий при заданном напряжении, практически представляет собой наиболее важный случай; однако и трансформатор тока, воспринимающий заданный ток имеет почти такое же значение в теории машин. Трансформатор напряжения при различных нагрузках изменяет лишь свой ток, оставляя без изменения как получаемое, так и отдаваемое им напряжение. Трансформатор тока, наоборот, работает при различных напряжениях, сохраняя величину подведенного и трансформированного тока.

Конечно, трансформаторы напряжения и тока являются лишь частными случаями, применяющимися при различных эксплуатационных условиях. Было бы совершенно ненужно их рассматривать особо, если бы при изучении прочих электрических машин мы снова не столкнулись с различием между трансформаторами тока и напряжения. Поэтому свойства указанных основных типов трансформаторов имеют большое значение.

Теория трансформатора опирается на немногочисленные физические законы, ставшие основными в электротехнике, и ограничивается рассмотрением переменных токов, изменяющихся во времени по закону синуса. В настоящее время мы оперируем чисто-синусоидальными напряжениями и токами. Большое преимущество в теории трансформаторов синусоидальных величин заключается в возможности применения графических методов, при исследовании дающих исключительно наглядные результаты. Как известно, изменяющиеся по закону синуса величины мы изображаем в виде векторов, величина которых равна амплитудному значению напряжения или тока; направление этих векторов соответствует фазовому углу. Линия времени на которую проектируются вектора для определения мгновенного значения, предполагается вращающейся с электрической угловой скоростью.

$$\omega = 2\pi f,$$

где f — число периодов сек.⁻¹ предполагается известным. Векторное представление, благодаря своей простоте, является необходимым подспорьем при изучении теории электрических машин.

3. ВЫПОЛНЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ. ЗАКОН ИНДУКЦИИ.

Наматываем на замкнутое железное кольцо w , последовательно соединенных витков из изолированной медной проволоки, как показано на рис. 1. К этим виткам, представляющим в совокупности обмотку, приложим напряжение E_1 , изменяющееся по закону синуса

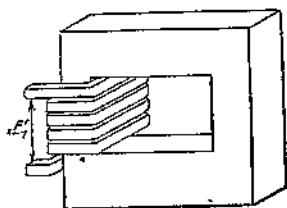


Рис. 1

$$E_{1t} = E_1 \cdot \sqrt{2} \sin \omega t,$$

где E_1 — эффективное значение напряжения, ω — электрическая угловая скорость, определяемая из известного нам числа периодов изменения напряжения f

$$\omega = 2\pi f.$$

Предположим, что проводник, из которого сделана обмотка, не обладает омическим сопротивлением. Подводимое напряжение тогда вызовет такой силы ток, который создаст поток, наводящий в обмотке напряжение, в любой момент уравновешивающее приложенное напряжение.

Пусть магнитный поток в некоторый момент времени t имеет Φ линий. По закону индукции этот поток наводит в каждом охватывающем его витке напряжение

$$E_{it} = - \frac{d\Phi_t}{dt} \cdot 10^{-8}.$$

Суммарное напряжение обмотки составляется из совершенно одинаковых напряжений отдельных витков. Оно потому в w_1 раз больше напряжения каждого витка. Равновесие напряжений наступит, когда

$$E_1 \cdot \sqrt{2} \sin \omega t \frac{1}{T} w_1 \cdot \frac{d\Phi_t}{dt} \cdot 10^{-8} = 0 \dots \dots \dots (2)$$

Из уравнения (2) находим

$$\Phi_t = \frac{E_1 \cdot \sqrt{2} \cdot 10^8}{\omega \cdot w_1} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right),$$

т. е., что магнитный поток является величиной переменной, изменяющейся с такой же периодичностью, как приложенное напряжение; максимальное значение числа силовых линий пропорционально эффективному значению подводимого напряжения.

Понятие о равновесии весьма важно для теории трансформатора, а следовательно, и для всей теории электрических машин. Приложенное напряжение должно находиться в равновесии с наведенным магнитным потоком напряжением. Это равновесие устанавливается во всякое время само собой; намагничивающий ток, вызывающий магнитный поток, возрастает до тех пор, пока не наступит равновесие. Одна из труднейших проблем эксплуатации трансформаторов — это создание надежной гарантии для равновесия напряжений.

С другой стороны, магнитный поток попадает в полную зависимость от подводимого напряжения. Магнитный поток изменяется вместе с напряжением и имеет одинаковое с напряжением число периодов. Разумеется, что эта зависимость является только следствием устанавливающегося с неумолимой точностью равновесия напряжений.

Находящийся под мощным электрическим воздействием магнитный поток на практике может нам оказать некоторую услугу. Он наводит напряжения в каждом витке другой, состоящей из w_2 витков, обмотке, также охватывающей этот поток, но электрически разделенной от первой обмотки. Совершенно очевидно, что все окружающие поток витки для него равнозначущи; в каждом из них поток наводит одинаковые напряжения. Таким образом, во второй обмотке появляется суммарное напряжение E_2 , величина которого относится к величине наведенного, а следовательно и приложенного к первой обмотке напряжения, — как число витков этих обмоток

$$E_1 : E_2 = w_1 : w_2 \dots \dots \dots (3)$$

После этого ясно, что вполне возможно произвольно уменьшать или увеличивать напряжение переменного тока, и что передаточное число может быть установлено достаточно точно.

При этом, однако, нужно, чтобы было соблюдено одно условие. Вызывающий трансформацию магнитный поток должен проходить всеми своими силовыми линиями как через обмотку, к которой приложено трансформируемое напряжение (первичную), так и через вторую обмотку, на клеммах которой устанавливается преобразованное напряжение (вторичную). Только при этом условии все витки равнозначущи, независимо к какой обмотке они ни принадлежали бы.

Мы заставляем силовые линии избрать желательный нам путь через отверстия внутри витков тем, что создаем на этом пути минимальное магнитное сопротивление, так как пропускаем поток по железу. Железо проводит магнитные линии в тысячу раз лучше, чем воздух. Таким путем практически удается претворить в жизнь идею трансформации напряжения.

Трансформатор немислим без железного сердечника, так же, как немислима без железного сердечника любая другая электрическая машина. Несмотря на то, что железо обладает рядом неприятных свойств, вследствие его магнитных особенностей, оно тем не менее, благодаря своей громадной магнитной проводимости, сделалось незаменимым в электромашиностроении.

В железных сердечниках трансформаторов мы различаем керны, на которых помещаются обмотки, и ярма, на которых обмоток нет. В механическом отношении весь сердечник является прочной опорой для обмоток, одетых на керны. Необходимость собирать сердечник из отдельных тонких листов дела не меняет.

4. НАГРУЗКА ТРАНСФОРМАТОРА. ЗАКОН РАВНОВЕСИЯ.

Вызываемая магнитным потоком трансформация напряжений может быть с исключительной простотой представлена при помощи векторной диаграммы.

Приложенное напряжение E_1 , вектор которого наносится первым на диаграмму (рис. 2), вызывает поток Φ ; вектор последнего, согласно уравнения (2), отстает на 90° от вектора напряжения E_1 . Наведенное потоком в первичной обмотке напряжение E_i отстает, как всякое наведенное напряжение, от своего потока на 90° . Таким образом его вектор имеет прямо

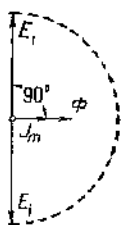


Рис. 2

противоположное направление с вектором E_1 . В фазе с магнитным потоком находится возбуждающий его намагничивающий ток I_m . Для трансформируемого напряжения этот ток является индуктивной нагрузкой, и его вектор отстает поэтому на 90° (рис. 2). Строго говоря намагничивающий ток нельзя изображать в виде вектора. Задачей намагничивающего тока является выравнивание всякого нарушения равновесия напряжений в первичной обмотке. На нем отражаются поэтому явления магнитного гистерезиса в железе. Как мы увидим позже, под действием гистерезиса он сильно искажается и не является синусоидальным, в то время как магнитный поток и вторичное напряжение строго синусоидальны, если только синусоидально приложено напряжение.

Как известно, только синусоидальные величины могут быть представлены в виде векторов. Если все-таки на диаграмме изображают намагничивающий ток, то под этим разумеют основную волну искаженной в действительности кривой. Необходимо с самого начала обратить внимание на это обстоятельство.

Пока мы имеем пред собой только картину ненагруженного трансформатора, так как во вторичной обмотке тока нет. Последняя во время работы должна обтекаться рабочим током, в чем, собственно говоря, и состоит нагрузка трансформатора.

Как только замыкается вторичная обмотка, в ней появляется рабочий ток I_2 (рис. 3). Он стремится нарушить равновесие напряжений в первичной обмотке, пытаясь возбудить сердечник. Очевидно, что ампервитки

нагрузки $I_2 w_2$ не должны проявлять себя. Магнитный поток сердечника должен всегда, несмотря на нагрузку, соответствовать равновесию напряжений в первичной обмотке.

Есть только один выход. Первичная обмотка берет из сети ток I_1 ; при этом ее ампервитки $I_1 w_1$ должны быть равны и противоположны ампервиткам вторичной обмотки

$$I_1 w_1 = I_2 w_2 \dots \dots \dots (4)$$

Действующим остается только намагничивающий ток I_m , обтекающий наряду с I_1 первичную обмотку.

На диаграмме рис. 4 вектор наведенного вторичного напряжения E_2 имеет то же направление, как и вектор наведенного магнитным потоком в первичной обмотке противодействующего напряжения E_1 . Вторичный нагрузочный ток I_2 отстает от вторичного напряжения E_2 на угол ϕ , величина которого определяется характером нагрузки. Этим же углом характеризуется направление вектора вторичных ампервитков $I_2 w_2$; вектор первичных витков $I_1 w_1$, необходимых для магнитного уравнивания действия тока I_2 , имеет прямо противоположное направление. Первичный суммарный ток складывается из тока нагрузки I_1 и из намагничивающего тока I_m . Легко убедиться в том, что первичный суммарный ток имеет такую же активную слагающую, как первичный ток нагрузки, так как намагничивающий ток I_m всегда является реактивным. Поэтому из рис. 4 имеем

$$I w_1 \cos \phi = I_2 w_2 \cos \phi,$$

откуда

$$I E_1 \cos \phi = I_2 E_2 \cos \phi,$$

чем достигается баланс энергии.

Идеальный трансформатор передает весь поток энергии без изменения с первичной обмотки на вторичную, при этом напряжения изменяются в отношении числа витков, а токи—обратно пропорционально числу витков первичной и вторичной обмотки. Кроме того, трансформатор загружает первичную сеть реактивным током—намагничивающим,—что необходимо для возбуждения магнитного потока.

Работа трансформатора при любой нагрузке регулируется двумя законами равновесия: электрическим и магнитным. Первое заключается в том, что в первичной обмотке должны уравниваться напряжения. Магнитное равновесие состоит в равенстве при нагрузке ампервитков первичных и вторичных, что в свою очередь, необходимо опять-таки для сохранения электрического равновесия.

Конечно, в первичной обмотке, в действительности, протекает всегда суммарный ток, а не его составляющие: нагрузочный ток и намагничивающий. Физически правильной было бы считать, что магнитный поток является результатом одновременного воздействия как первичных, так и вторичных ампервитков. Но очевидно, что в этом случае, активными в магнитном отношении являются лишь ампервитки намагничивающего тока $I_m w_1$.

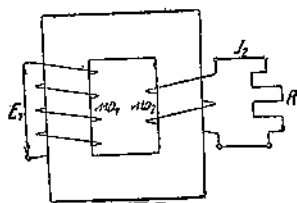


Рис. 3

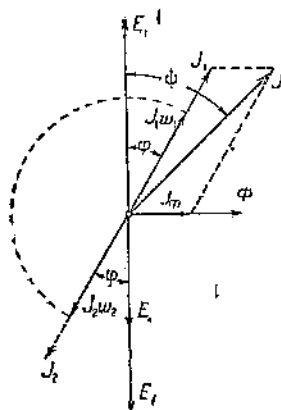


Рис. 4.

Рис. 4 соответствует также и этому представлению. Последнее, после данного выше описания принципа действия идеального трансформатора, понятно без дальнейших рассуждений; это представление, кроме того, делает особенно понятным нижеследующее равенство

$$E_1 I w_1 \cos \varphi = E_2 \cdot I_2 w_2 \cos \varphi.$$

5. ПАДЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ПОТЕРЯ ЭНЕРГИИ.

Реальный трансформатор отличается от идеального во многом. Эти отклонения должны быть рассмотрены теорией. Дело в том, что провода обеих обмоток обладают сопротивлением, а железо допускает прохождение некоторых силовых линий через воздух.

Если первичная обмотка имеет некоторое омическое сопротивление R (ом), то часть приложенного напряжения E_1 должна пойти на преодоление падения напряжения в этом сопротивлении.

Теперь уже не только одно наведенное магнитным потоком напряжение E_2 должно уравновешивать приложенное напряжение E_1 , теперь ему приходит на помощь падение напряжения в омическом сопротивлении IR_1 .

Таким образом, теперь трансформируется не полное напряжение E_1 , а разность между последним и IR_1 . То же самое можно себе представить, если предположить, что одновременно с напряжением E_1 трансформируется и омическое падение напряжения $I_1 R_1$, действие которого проявляется во вторичной обмотке.

Но вторичная обмотка имеет свое омическое сопротивление R_2 , от чего и в ней происходит падение напряжения $I_2 R_2$. Так-то на клеммах вторичной обмотки мы располагаем напряжением, меньшим на величину падения напряжения во вторичной обмотке $I_2 R_2$ и на величину трансформированного падения напряжения

$$IR_1 \cdot \frac{w_1}{w_2},$$

чем соответствующее вторичное напряжение идеального трансформатора

$$E_1 \frac{w_1}{w_2}.$$

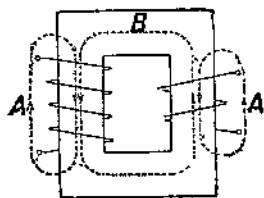


Рис. 5

Действительный трансформатор работает с потерей напряжения. Но описанное выше падение напряжения не является единственным. Приходится учитывать еще другие падения напряжения, так как обмотки имеют, кроме омических, еще индуктивные сопротивления.

Ампервитки обеих обмоток возбуждают силовые линии, замыкающиеся вокруг находящихся под током проводов. Только в железе, в этом естественном русле магнитного потока, силовые линии от ампервитков обеих обмоток действуют почти все друг другу навстречу, тем самым оставляя в силе только ампервитки намагничивающего потока. Однако остаются еще пути для силовых линий, охватывающих только одну из обмоток (рис. 5). Эти силовые линии возбуждаются ампервитками соответствующей обмотки.

Наряду с главным потоком, сцепленным с витками обеих обмоток, существует еще первичный и вторичный поток рассеяния. Первичный поток рассеяния, сцеплен только с первичной обмоткой, а вторичный — только со вторичной обмоткой. Главный поток возбуждается разностью

которого совпадает по направлению с I , и падение напряжения Ix , отстающее от I на 90° . Построение вектора E_1 ясно из рис. 6.

Рис. 6 дает представление о потере напряжения в трансформаторе. Закон трансформации напряжений действителен только для напряжений, наведенных главным потоком

$$E_{11} : E_{22} = w_1 : w_2.$$

Закон трансформации нагрузочных токов, гласящий

$$I_1 : I_2 = w_2 : w_1,$$

остается в силе.

В реальном трансформаторе большое значение имеют Джоулевы потери $I^2 R_1$ и $I^2 R_2$. Они отражаются на стоимости электрической энергии, уменьшающейся в результате трансформации. Эти потери являются доминирующими в трансформаторе.

Как известно, в железном сердечнике также происходят потери. Для полного перемагничивания железа в течение каждого периода требуется энергия, что ведет к потерям на перемагничивание. Кроме того, вокруг силовых линий в железе, являющемся, как известно, хорошим проводником, образуются вихревые токи, вызываемые последними. Джоулевы потери называются потерями на вихревые токи. Они уменьшаются с уменьшением толщины железных листов; избавиться от них окончательно, однако, невозможно.

Несовершенство материалов вызывает несовершенство трансформации. Вообще, нет машины, которая работала бы без потерь. Трансформатор в свою очередь не может не разделить участи всех устройств нашего несовершенного мира. Однако, необходимо тут же отметить, что реальный трансформатор все-таки мало отличается от идеального. Падение напряжения в трансформаторе выражается в сотых долях рабочего напряжения. Точно так же и потери в трансформаторе уменьшают мощность трансформируемого потока энергии на сотые доли.

Иначе и не могло бы быть. Потери энергии проявляются в виде выделения тепла при работе; это тепло должно отводиться, во избежание перегрева трансформатора. Изолирующие материалы, окружающие проводники обмотки, не выносят высоких рабочих температур. Все части трансформатора неподвижны, вследствие чего отвод тепла в окружающий воздух является еще более необходимым.

Как раз эта необходимость надлежащего охлаждения заставляет нас снижать величину потери энергии. Очень большие трансформаторы потребляют около одной сотой всего количества трансформированной энергии, а малые трансформаторы, обладающие относительно большой охлаждающей поверхностью, редко удерживают более 5% протекающей энергии.

Падение напряжения стоит в определенной зависимости от потерь энергии в обмотках, что мы будем иметь возможность доказать более точно. Оно держится поэтому, во избежание неприятных последствий, в известных пределах. Нужно сказать, что трансформатор является самой совершенной электрической машиной, любое исполнение которой более совершенно, чем всякая другая конструкция в машиностроении.

6. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ТРАНСФОРМАТОРА.

Векторная диаграмма дает хорошее представление о работе трансформатора и является незаменимой при изучении происходящих в нем электрических и магнитных явлений; недостатком векторной диаграммы

является необходимость для каждого отдельного случая строить диаграмму сначала. Необходимо поэтому иметь еще одно вспомогательное средство, которое хотя и требует в конечном счете применения векторной диаграммы, но дает сразу представление о всех эксплуатационных возможностях. Это средство — *эквивалентная схема* трансформатора.

Теория переменных токов дает нам возможность охватить все происходящее в цепи тока явления, как бы эта цепь сложна ни была. Поддаются изучению также непостоянные цепи, т.-е. такие цепи, в которых не все сопротивления остаются неизменными. Мы можем проследить, в каких пределах изменяется суммарный ток непостоянных цепей, когда эти сопротивления будут принимать все возможные значения. Однако эта теория не дает нам возможность рассмотреть трансформатор, так как он состоит из двух цепей, своеобразно влияющих друг на друга. Необходимо поэтому приступить к эквивалентной схеме.

Начнем с рассмотрения трансформатора с передаточным числом 1:1. Ток нагрузки I_1 и I_2 в обеих обмотках в этом случае одинаковы. Точно так же и напряжения, наводимые в первичной и вторичной обмотках главным магнитным потоком, будут в точности одинаковы.

Если мы вычтем из приложенного напряжения E_1 омическое и индуктивное падение напряжения в первичной обмотке, то у нас останется напряжение, уравнивающее наведенное главным магнитным потоком противодействующее напряжение. Допустим, что это остаточное напряжение в действительности имеет место во вторичной обмотке. Этим самым мы делаем заведомо ошибку, в результате которой ток нагрузки во вторичной обмотке окажется направленным прямо противоположно действительному току.

Но в этом заключается как раз преимущество указанного искусственного приема, так как теперь мы можем просто себе представить, что первичная обмотка обтекается вторичным током; в виду этого последний полностью заменяет собой первичный ток нагрузки. Таким способом мы получаем схему рис. 7, на которой цепи первичной и вторичной обмотки электрически соединены.

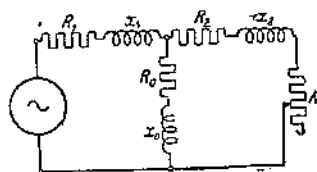


Рис. 7

Параллельно вторичной обмотке приложим фиктивное индуктивное сопротивление x_0 такой величины, чтобы с одной стороны первичное остаточное напряжение, играющее роль напряжения, наведенного главным магнитным потоком, действительно имело место, и, с другой стороны, мог бы проходить намагничивающий ток трансформатора. Тогда в нашей эквивалентной схеме через сопротивление первичной обмотки x_1 и R_1 потечет ток, состоящий из обратного вторичного тока нагрузки и из намагничивающего тока.

Обыкновенно в эквивалентной схеме в ветвь намагничивающего тока включается еще фиктивное омическое сопротивление. Джоулевы потери в этом сопротивлении заменяют собой потерю энергии в железе. Таким образом в построенной нами электрической цепи все потери трансформатора имеют свою действительную величину.

Из вышеизложенного следует, что суммарный первичный ток содержит еще намагничивающий активный ток. Ток холостого хода состоит из намагничивающего тока; он протекает по первичной обмотке даже при разомкнутой второй обмотке. На самом же деле, при холостом ходе трансформатор забирает не только необходимый намагничивающий ток, но еще небольшой активный ток, покрывающий потери в железе.

В точной векторной диаграмме (рис. 8) эта слагающая показана. Искусственный прием эквивалентной схемы, правильно повторяющий все потери энергии, все падения напряжений и все токи, применим лишь, казалось бы, для коэффициента трансформации 1:1. Но если бы это действительно было так, этот метод оказался бы бесполезным. К счастью эквивалентная схема может быть применена для любого соотношения витков первичной и вторичной обмотки $w_1:w_2$.

Вообще говоря

$$I_1 = I_2 \frac{w_2}{w_1} \quad \text{и} \quad E_{11} = E_{12} \frac{w_1}{w_2}.$$

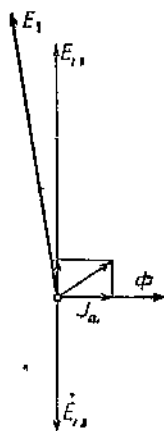


Рис. 8.

Мы можем предположить, что имеем дело с передаточным числом 1:1, если все напряжения и падения напряжения вторичной обмотки увеличим в $\frac{w_1}{w_2}$ раз, а все токи этой обмотки уменьшим в $\frac{w_1}{w_2}$ раз. Исходя из этого, в эквивалентную схему мы вводим все сопротивления, увеличенными в $\left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2$ раз, т.-е:

$$R_2^1 = R_2 \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2$$

$$x_2^1 = x_2 \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2$$

и для потребителя

$$Z_1 = \sqrt{R'^2 + x'^2} = Z_1' \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 = \sqrt{\left(R \frac{w_1^2}{w_2^2}\right)^2 + \left(x \frac{w_1^2}{w_2^2}\right)^2}.$$

Выходит, что увеличенные в $\frac{w_1}{w_2}$ раз вторичные напряжения вызывают прохождение уменьшенного в $\frac{w_1}{w_2}$ раз тока через увеличенные в $\left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2$ раз сопротивления. Зато Джоулевы потери во вторичной обмотке остаются неизменными

$$\left(I_2 \frac{w_2}{w_1}\right)^2 \cdot R_2 \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 = I_2^2 R_2.$$

Точно так же сохраняют свою величину все падения напряжений, например омические

$$\frac{I_2 \cdot R_2}{E_{12}} = \frac{I_2 \frac{w_2}{w_1} \cdot R_2 \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2}{E_{12} \cdot \frac{w_1}{w_2}}.$$

Эквивалентная схема рис. 9 дает нам точную картину работы трансформатора при любом передаточном числе, благодаря чему теория получает возможность изучения непостоянных цепей, а вместе с тем трансформатора в разных эксплуатационных условиях. Для трансформатора не имеет смысла применять полностью известную из теории переменных токов круговую диаграмму; его принцип действия слишком прост, и два закона трансформации напряжений и токов для практики вполне достаточны. Однако совершенно необходимо более точно

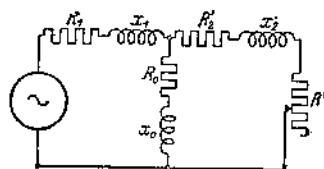


Рис. 9

рассмотреть оба крайних случая в эксплуатации трансформаторов — прохождения наименьшего и наибольшего токов нагрузки, что соответствует бесконечно большому и ничтожно малому сопротивлению во вторичной обмотке (холостой ход и короткое замыкание). При этом предполагается, как и прежде, что к трансформатору подводится напряжение, эффективное значение которого неизменно; другими словами, будем считать, что мы имеем дело с трансформатором напряжения.

7. ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ В ЖЕЛЕЗНОМ СЕРДЕЧНИКЕ.

Явления при холостом ходе трансформатора вполне понятны. Через бесконечно большое сопротивление вторичной обмотки не может протекать ток нагрузки; в виду этого в первичной обмотке имеет место только намагничивающий ток и небольшой активный ток, покрывающий потери в железе.

Состоящий из двух частей ток холостого хода мал по сравнению с допускаемым максимальным током в первичной обмотке; он составляет едва 10% последнего. Падение напряжения в первичной обмотке, при холостом ходе, настолько незначительно, что наведенное главным магнитным потоком напряжение почти равняется приложенному напряжению. Во всяком случае главный магнитный поток при холостом ходе должен иметь максимальное число силовых линий.

Но, хотя режим холостого хода сам по себе прост, все же в нем имеются некоторые тонкости. Характер изменения магнитного потока в железе во времени одинаков, с характером изменения приложенного напряжения. Если мгновенное значение последнего

$$E_{it} = E_1 \sqrt{2} \cdot \sin \omega t,$$

то мгновенное значение главного магнитного потока Φ_t выразится следующим образом

$$\Phi_t = \Phi_{\max} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

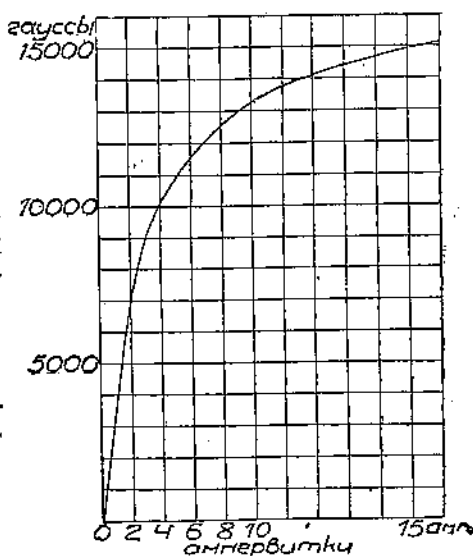


Рис. 10

Как известно, магнитные потоки характеризуются не эффективными значениями числа силовых линий, а максимальными. Причина этого лежит в своеобразно изменяющейся магнитной проводимости железа. Только максимальное число силовых линий дает нам возможность немедленно определить, как далеко мы зашли с насыщением железа.

Число силовых линий главного магнитного потока изменяется в зависимости от возбуждающих ампервитков первичной обмотки по так называемой кривой намагничивания; эта кривая, отнесенная к 1 см пути в железе, дана на рис. 10.

Синусоидально меняющийся магнитный поток нуждается в намагничивающих ампервитках, форма кривой которых сильно отличается от синусоиды (рис. 11). Но на самом деле возбуждение железного сердечника

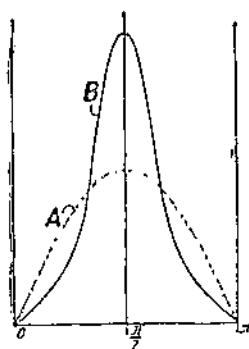
не следует кривой намагничения, так как железо каждый период должно полностью перемагнититься.

Вместо кривой намагничения, вступает в силу известная петля гистерезиса (рис. 12), а ток холостого хода протекает по кривой рис. 13. При этом появляется активная составляющая тока холостого хода, соответствующая потерям перемагничивания.

Рис. 11 дает чистый намагничивающий ток. Кривыми намагничения принято пользоваться в электромашиностроении, когда для возбуждения берется постоянный ток. Этим заведомо упраздняется активная составляющая гистерезиса; многократные потери на перемагничивание пропадают, потеря в железе получается только один раз.

Кривая намагничивающего тока тем сильнее отличается от синусоиды, чем больше вызванное им насыщение трансформатора. Она содержит заметную высшую гармоническую с тройным числом периодов, по своим действиям гораздо менее невинную, как это может показаться с первого взгляда. Покрывающий потери в железе активный ток мы можем, конечно, мыслить не искаженным. Он пропорционален потерям, если под-

водимое напряжение остается постоянным.



А — магнитный поток

Рис. 11

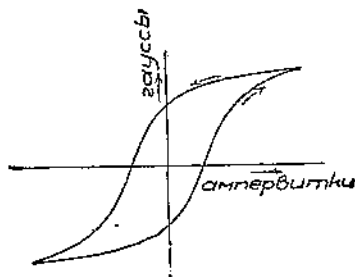


Рис. 12

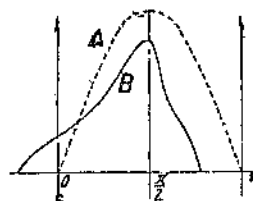


Рис. 13

При определении величины потерь в железе почти всегда пользуются формулой Штейнмеца. Весьма сомнительно, чтобы эта эмпирическая формула, полученная в результате опытов над применявшимся ранее листовым железом, была бы годна также и для современного легированного и высоколегированного железа.

Как было уже упомянуто, потери в железе распадаются на потери на перемагничивание и на потери на вихревые токи. Потери на перемагничивание пропорциональны числу периодов, так как работа, связанная с поворачиванием молекул в железе, повторяется каждый период. Штейнмец принял, что потери на перемагничивание возрастают пропорционально 1,6 степени плотности силовых линий. В настоящее время с достаточной уверенностью можно сказать, что следует брать квадрат плотности силовых линий. Потери на вихревые токи получаются из Джоулева тепла, выделяемого вихревыми токами в железе. Вследствие непостоянства магнитной проводимости железа, определить эти потери точно нет возможности. Но основной закон, которому они следуют, легко получить без сложных подсчетов.

В разрезе железного листа вихревые токи протекают приблизительно, как показано на рис. 14. Каждая из показанных на чертеже цепей охватывает большую или меньшую часть проходящего через сечение железа пучка силовых линий. Возникающее в этих цепях напряжение определенно имеет периодичность магнитного потока; кроме того, она пропорциональна максимальной плотности силовых линий магнитного потока.

Вихревые токи, конечно, пропорциональны напряжениям, наведенным в их цепи. В виду этого, потери на вихревые токи должны быть пропорциональны квадрату числа периодов и квадрату плотности силовых линий магнитного потока.

Нам весьма удобно считать суммарные потери в железе пропорциональными квадрату плотности силовых линий. Периодичность имеет меньшее значение, так как мы будем считать, что периодичность во всех наших установках постоянна. Рекомендуются, однако, в формулу для определения суммарных потерь в железе вводить также и число периодов. Потери возрастают приблизительно 1,3 степени из числа периодов.

Если мы обозначим

V_e — суммарные потери в железе в ваттах.

G_e — вес железа в кг.

B — максимальная плотность силовых линий в гауссах.

f — число периодов.

K_e — постоянная потерь данного сорта железа в ваттах на кг,

то можно написать

$$V_e = K_e \cdot \left(\frac{B}{10\,000} \right)^2 \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} G_e \text{ ватт} \quad (5)$$

Для так называемого высоколегированного трансформаторного железа принимаем

$$K_e \approx 1,3 \text{ ватт/кг.}$$

Для обыкновенного легированного железа, каковое применяется и для прочих электрических машин, берется

$$K_e \approx 2,3 \text{ ватт/кг.}$$

Активная составляющая холостого хода I_v , покрывающая потери в железе, вызывается наведенным магнитным потоком суммарным напряжением E_{11} поэтому

$$E_{11} \cdot I_v = V_e.$$

С достаточной точностью можно положить

$$I_v = \frac{V_e}{E_{11}}.$$

8. НАМАГНИЧИВАЮЩИЙ ТОК ТРАНСФОРМАТОРА.

Трансформатор работает вхолостую чаще любой другой машины. Если, например, трансформатор должен питать осветительную сеть, то его приходится держать под напряжением день и ночь для того, чтобы он всегда был готов дать ток для освещения. Только несколько часов в сутки, вечером, он бывает действительно загружен полностью. Ранним утром, поздно ночью, в полдень он работает вхолостую, или с незначительной нагрузкой.

Потери в железе почти равнозначны потерям холостого хода, так как Джоулево тепло, выделяющееся при холостом ходе первичной обмотки, ничтожно мало; потери в железе при своеобразных условиях нагрузки трансформатора приобретают особое назначение. Несмотря на то, что они сами по себе невелики, с ними приходится считаться, вследствие их непрерывности. Необходимо, насколько возможно, эти потери снизить.



Рис. 14

Во всяком случае, при желании сделать трансформацию экономичной, стремятся уменьшить потерю в железе в гораздо большей степени, чем потери в меди, величина которых прямо пропорциональна квадрату тока нагрузки.

Малые потери в железе получаются при малой плотности силовых линий в железном сердечнике. Мы не можем далеко идти с насыщением железа еще потому, что при этом сильно возрастает намагничивающий ток, который, как мы в этом убедились, уменьшает коэффициент мощности всей установки.

Магнитный поток с постоянной плотностью силовых линий B гауссов требует на каждый сантиметр его пути определенное количество ампервитков в первичной обмотке; это количество ампервитков, согласно закона намагничивания, обратно пропорционально магнитной проницаемости (μ) железа

$$B = \frac{4\pi}{10} \mu \cdot \frac{I_m \cdot w_1 \cdot \sqrt{2}}{l}$$

Максимальному значению B плотности силовых линий индукции соответствует, понятно, максимальное значение намагничивающего тока

$$I_m \cdot \sqrt{2}$$

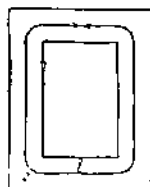


Рис. 15

l (см) — средняя длина силовой линии в железном сердечнике (рис. 15).

Несмотря на высокую магнитную проводимость высоко легированного железа, мы вынуждены не повышать индукции выше 13000—14000 гауссов, чтобы намагничивающий ток не превысил допустимых пределов (см. рис. 10). Нередко мы прибегаем к одному средству, которое применяют и в других электрических машинах, а именно мы уменьшаем индукции в ярме, т.-е. в той части железного сердечника, которая не имеет обмотки. Преимущество этого в том, что при этом мы увеличиваем только не обмотанные железные части. Понятно, что ограничение индукции в кернах, на которые одеты обмотки, привело бы так же, как в ярме, к увеличению сечения железа. Но с увеличением сечения кернов удлиняются и обмотки, увеличивается вес меди и потери в ней. Увеличение же сечения ярма не имеет таких последствий.

Для того, чтобы было возможно одевать обмотку на керн, необходимо, чтобы, по крайней мере, одно ярмо было съемным. В виду этого, получается небольшой воздушный зазор. Магнитная проницаемость воздуха в 2000 раз меньше, чем железа. Воздушный зазор, вследствие этого, отражается неблагоприятно на намагничивающем токе, даже если зазор будет взят возможно минимальных размеров.

При расчете тока холостого хода трансформатора железный сердечник последнего разбивается на отдельные части, каждая из которых рассчитывается особо. Как мы увидим позже, то же самое делают при расчете железных сердечников прочих электрических машин. Всегда можно расчленить следующие части: часть, пронизывающую обмотки, воздушный зазор и, наконец, часть, свободную от обмоток (рис. 16).

Естественно, что обмотанная часть железного сердечника, вследствие высокой индукции, требует наибольшего числа возбуждающих ампервитков на 1 см длины, скажем $f(B)$ ампервитков. Если в воздушном зазоре,

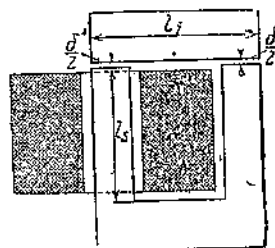


Рис. 16

шириной δ см должна иметь место такая же индукция, как в керне, то для этой цели потребуются:

$$\frac{B \cdot \delta}{0,4 \pi} = 0,8 B \cdot \delta \text{ ампервитков.}$$

В ярме только $\frac{B}{a}$ силовых линий приходится на квадратный сантиметр, если сечение его в a раз больше сечения керна. На каждый сантиметр длины ярма понадобится $f \left(\frac{L}{a} \right)$ ампервитков. Таким образом, пользуясь обозначениями рис. 16, получим суммарное число возбуждающих ампервитков

$$I_m \cdot \omega_1 \cdot \sqrt{2} = 2 \cdot l_s \cdot f(B) + 0,8 B \cdot \delta = 2 l_s \cdot f \left(\frac{B}{a} \right).$$

Так как $f(B)$ определяется из кривой намагничения рис. 10, снятой при постоянном токе, то нужно в левой части приведенного уравнения при помощи множителя $\sqrt{2}$ перевести эффективное значение I_m в максимальное.

В том случае, когда в ярме индукция меньше, чем в кернах, потери тоже нужно подсчитывать отдельно в ярме и отдельно в кернах. Усиленное ярмо уменьшает не только намагничивающий ток, но и потери в железе.

9. ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ НА НАГРУЗКУ ТРАНСФОРМАТОРА

При максимально допускаемой нагрузке в меди обмоток возникают и максимальные потери. Последние зависят только от омических сопротивлений обмоток и от тока нагрузки; на них ни в коей мере не влияет сдвиг фаз φ между током и напряжением.

Если учесть, что с одной стороны величина напряжения определяет намагничивающий ток и потери в железе, а ток нагрузки задает потери в меди, и что с другой стороны потери не должны превосходить определенной величины, из соображений нормального отвода тепла, то станет ясно, что трансформаторы строятся не на определенную мощность в киловаттах, а на определенное произведение из тока и напряжения (киловольтамперы).

Это важное обстоятельство по тем же основаниям имеет место у всех электрических машин; оно при известных условиях приобретает особое значение. Если, например, при эксплуатации гидравлической энергии необходимо получить N_0 киловатт, то генератор при турбине не может быть взят тоже в N_0 киловольтампер. В эксплуатации всегда получаются индуктивные нагрузочные токи, а следовательно, $\cos \varphi$ всегда оказывается меньше единицы. Генератор не может дать больше N_0 киловольтампер, и если он по неосторожности заказан именно на эту мощность, то будет нагружать турбину только на $N_0 \cdot \cos \varphi$ киловатт, вследствие чего гидравлическая энергия не будет полностью использована. В виду этого при проектировании каждой электрической установки нужно оценить коэффициент мощности, а генератор заказать мощностью

$$\frac{N_0}{\cos \varphi} \text{ киловольтампер.}$$

При этом нужно быть осторожным и не брать коэффициента мощности слишком высоким и тем самым не иметь возможности использовать полностью имеющийся источник энергии; с другой стороны не нужно

быть и слишком осторожным, выбрав коэффициент мощности чересчур низким, вследствие чего генератор получится слишком дорогим.

Потери в меди являются чрезвычайно важным фактором в эксплуатации, но не менее важны и падения напряжений. Мы видели уже, что у трансформатора первичные падения напряжений полностью трансформируются. Измеренные в процентах рабочего напряжения, они могут быть просто добавлены к падению напряжения во вторичной обмотке, также выраженному в процентах; конечно, подобное сложение происходит таким образом, что индуктивные сопротивления составят суммарное индуктивное падение напряжения Δe_i (в процентах), а омические — суммарное омическое падение напряжения Δe_r (также в процентах); это производится простым сложением. Падения напряжения высчитываются всегда для максимально допустимого тока нагрузки.



Рис. 17

Вследствие своей малости, как показывает рис. 17, величины падения напряжения практически принимаются равными их проекции на вектор рабочего напряжения. На векторной диаграмме рис. 17 показано также, как учитывается сдвиг фаз φ между током и напряжением. Практически мы получаем значение суммарного падения напряжения

$$\Delta e = \Delta e_i \cdot \cos \varphi + \Delta e_r \cdot \sin \varphi \text{ процентов.}$$

При безындукционной нагрузке мы в действительности имеем только омическое падение напряжения

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= 1, \\ \Delta e &= \Delta e_r. \end{aligned}$$

Стоит отметить, что относительная величина омического падения напряжения и отношение потерь в меди ко всей мощности находятся в простой взаимной связи. Мы имеем всегда

$$\frac{I^2 R}{I \cdot E} = \frac{I R}{E},$$

т.е. что омическое падение напряжения составляет такой же процент от рабочего напряжения, какой составляют потери в меди от общей мощности. Данные о падении напряжения при безындукционной нагрузке, как это обыкновенно дается в предложениях, для посвященных оказываются вдвойне ценными.

Потери в меди во всем электромашиностроении не высчитываются непосредственно по омическим сопротивлениям. Весьма просто, конечно, высчитать омическое сопротивление проводника длиной 1 м, сечением F кв. мм при удельном сопротивлении ρ (ом. $\frac{\text{мм}^2}{\text{м}}$)

$$R = \rho \cdot \frac{1}{F} \text{ ом.}$$

Потери на Джоулево тепло от протекающего по этому сопротивлению тока I (ампер)

$$R J^2 = \rho \cdot \frac{1}{F} \cdot I^2.$$

Приняв удельный вес провода γ_k (кг/куб. дм) получим его вес

$$G_k = 1 \cdot F \cdot 10^{-3} \cdot \gamma_k \text{ кг.}$$

На основании этого формула для нахождения потерь переписывается следующим образом

$$V_k = R I^2 = \rho \left(\frac{I}{F} \right)^2 \cdot \frac{G_k}{\gamma_k \cdot 10^{-8}}.$$

Подобно тому, как это было с потерями в железе, можно также и потери в меди выразить через вес провода G_k , плотность тока

$$\frac{I}{F} = C \text{ (А/мм}^2\text{)}$$

и через коэффициент потерь, равный для меди при рабочей температуре

$$K_k = \rho \cdot \frac{10^8}{\gamma_k} \cdot \approx 2,4.$$

Подставляя все это, получим

$$V_k = K_k \cdot C^2 \cdot G_k \text{ ватт} \dots \dots \dots (6)$$

Для потерь в железе для обычного числа периодов

$$f = 50 \text{ сек.}^{-1}$$

мы имели

$$V_s = K_s \cdot \left(\frac{B}{10\,000} \right)^2 \cdot G_s \text{ ватт} \dots \dots \dots (7)$$

Для теории электрических машин является несомненным преимуществом выразить потери энергии всегда через веса и квадрат электромагнитного напряжения материалов. Здесь же важно отметить, что коэффициенты потерь K_k и K_s необходимо выбирать весьма осторожно. В железных сердечниках всегда имеются добавочные потери на вихревые токи, так как касание отдельных листов неизбежно, что открывает для вихревых токов больший путь, нежели это было предположено в проекте. В самой меди также имеются потери на вихревые токи, порождаемые потоком рассеяния, подобно тому, как вихревые токи в железе создаются главным потоком.

В трансформаторостроении K_s редко превышает свою теоретическую величину больше, чем на 30%, а K_k больше, чем на 10%. В других электрических машинах наблюдаются большие отклонения, что слишком часто является неприятной неожиданностью.

10. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА.

При коротком замыкании совершенно исчезают нагрузочные сопротивления во вторичной обмотке; трансформатор, можно сказать, включается на свое собственное сопротивление. Приложенное к трансформатору напряжение должно полностью погаситься его омическими и индуктивными сопротивлениями. Ток короткого замыкания должен быть поэтому значительно больше, чем допускаемый ток нагрузки, который поглощает в сопротивлениях лишь сотые доли приложенного напряжения.

Векторную диаграмму коротко замкнутого трансформатора нельзя начинать строить со вторичного напряжения на клеммах, так как последнее равно нулю. Всякое даже весьма малое напряжение на клеммах вызвало бы, конечно, прохождение бесконечно большого тока через ничтожно малое сопротивление коротко замкнутой цепи. Вектор тока короткого замыкания I_{k2} определяет направление вектора вторичного омического падения напряжения $I_{k2} R_2$ (рис. 18).

Один взгляд на рис. 19 убеждает нас в том, что фазовый угол при коротком замыкании φ_k как раз представляет собой это максимальное значение. Подставляя вычисленный таким образом угол сдвига фаз в уравнение суммарного падения напряжения, получим, что напряжение короткого замыкания представляет собой как раз величину максимально возможного падения напряжения.

В виду этого имеется полное основание пометать, кроме падения напряжения при полной нагрузке и $\cos \varphi = 1$, также и напряжение короткого замыкания как в предложениях, так и на заводском щитке трансформаторов, на котором должны быть выбиты все наиболее важные данные. Зная e_k и Δe_r , можно легко определить индуктивное падение напряжения Δe_x .

Индуктивное падение напряжения трансформатора нельзя допускать чрезмерно большим, но с другой стороны оно не должно быть и слишком малым. Ток короткого замыкания, как легко убедиться, в

$$\frac{100}{e_k} \text{ раз}$$

больше, чем рабочий ток. Коротких замыканий, вообще говоря, не должно быть, но тем не менее их надо принять в расчет, как всякий возможный несчастный случай в эксплуатации. Тепло, выделяющееся при коротком замыкании, не должно повредить обмотки в течение тех немногих секунд, которые нужны автоматическому выключателю для выключения. С другой стороны, механические усилия, развивающиеся при коротком замыкании между обтекаемыми током проводниками, также не должны изгибать последние. В виду этого малые трансформаторы выполняются с напряжением короткого замыкания 4%, напряжение короткого замыкания крупных трансформаторов берется 6—10%.

Омическое падение напряжения при больших мощностях слишком мало, чтобы оно одно могло ограничить ток короткого замыкания. Условия охлаждения трансформатора не позволяют это сделать. Остается только один выход, а именно: увеличить индуктивное падение до соответствующего значения.

С другой стороны очень высокое индуктивное падение напряжения при обычных коэффициентах мощности наших установок

$$\cos \varphi = 0,7 - 0,8$$

неприятно отражается на чрезмерно большом падении рабочего напряжения. После всего сказанного важно указать, каким образом мы можем влиять на величину индуктивного падения напряжения. Величина индуктивного падения напряжения есть результат умножения тока полной нагрузки на индуктивное сопротивление обмотки. Индуктивное сопротивление обмотки равняется произведению из индуктивности обмотки на электрическую угловую скорость

$$\omega = 2\pi f \cdot L.$$

Индуктивность L , как известно, пропорциональна числу витков и числу силовых линий потока рассеяния, возбуждаемых током обмотки, силой в 1 ампер. Это число силовых линий обратно пропорционально средней длине линий потока рассеяния и прямо пропорционально поперечному сечению потока рассеяния.

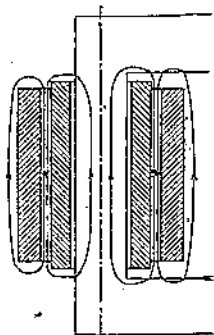


Рис. 20

В конструктивном отношении мы можем воздействовать только на поперечное сечение потока рассеяния. Рис. 20 показывает, что оба потока рассеяния концентрически расположенных друг относительно друга обмоток должны проходить в промежутке между обмотками. Возбуждаемые токами нагрузки обеих обмоток, направленными в противоположные стороны, потоки рассеяния теснят друг друга в промежутке между обмотками, даже и в случае катушечной обмотки, т.е. когда обмотки сидят на стержне рядом. В виду этого обе обмотки должны быть близко сдвинуты друг к другу; было бы неправильно помещать первичную обмотку на один стержень, а вторичную обмотку — на второй стержень, так как при этом индуктивное падение напряжения возросло бы чрезмерно. Небольшими изменениями воздушного промежуточного пространства можно добиться изменения индуктивного падения напряжения в широких пределах.

11. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ.

Осветим принцип действия трансформатора на числовом примере, данные которого по своей величине соответствуют данным современных конструкций. В основу положим данные трансформаторного щитка

Мощность	100 kVA.
Коэффициент трансформации напряжений при холостом ходе	10 000/230 вольт
Потери холостого хода	600 ватт
Падение напряжения при полной нагрузке и $\cos \varphi = 1$	2,5%
Напряжение короткого замыкания	4,5%
Число периодов	50 в сек.

Из того факта, что при холостом ходе практически отсутствует падение напряжения, выводим следующую зависимость между витками обеих обмоток

$$10\,000:230.$$

Далее находим: индуктивное падение напряжения

$$\Delta e_i = \sqrt{4,5^2 - 2,5^2} = 3,75\%$$

и потери в меди

$$\frac{2,5}{100} \cdot 100\,000 = 2\,500 \text{ ватт.}$$

Устанавливаем, что трансформатор берет на себя при полной нагрузке

$$600 + 2\,500 = 3\,100 \text{ ватт} = 3,1 \text{ kW.}$$

Суммарное падение напряжения при полной нагрузке и $\cos \varphi = 0,8$ окажется равным

$$2,5 \cdot 0,8 + 3,75 \cdot \sqrt{1 - 0,8^2} = 4,25\%.$$

Эта величина значительно выше, чем падение напряжения при $\cos \varphi = 1$ только немного ниже максимально возможного падения — 4,5%. При полной нагрузке и $\cos \varphi = 0,8$ вторичное напряжение будет

$$230 (1 - 0,0425) = 220 \text{ вольт,}$$

а вторичный ток полной нагрузки определяется в

$$\frac{10\,000}{220} = 454 \text{ ампера.}$$

Этому току соответствует первичный ток нагрузки

$$454 \cdot \frac{230}{10.000} = 10,45 \text{ ампера,}$$

к которому следует добавить намагничивающий ток, чтобы получить суммарный протекающий в первичной обмотке ток. Намагничивающий ток вряд ли будет больше 1 ампера, если вся конструкция находится в порядке; в этом случае суммарный ток первичной обмотки будет равен 11 ампер.

Экономичность трансформатора, как и экономичность любой другой машины, определяется отношением отданной мощности к полученной, т. е. так называемым коэффициентом полезного действия.

Например, наш трансформатор отдает при полной нагрузке и $\cos \varphi = 1$ 100 kW, потребляет в железе 600 ватт, в меди — 2 500 ватт; таким образом, он должен забирать 103,1 kW. Его коэффициент полезного действия равен

$$\eta = \frac{100}{103,1} = 0,97 = 97\%.$$

При коэффициенте мощности 0,8 трансформатор отдает только

$$100 \cdot 0,8 = 80 \text{ kW,}$$

имея те же потери в железе и меди. В этом случае коэффициент полезного действия падает до

$$\eta = \frac{80}{83,1} = 0,9627 = 96,27\%.$$

Весьма важен тот факт, что коэффициент полезного действия не должен падать с уменьшением нагрузки. Потери в железе практически не зависят от нагрузки, но зато потери в меди вырастают пропорционально квадрату нагрузки, так как при постоянном рабочем напряжении рабочий ток изменяется одинаково с нагрузкой. Например, наш трансформатор при половинной безындукционной нагрузке отдает 50 kW, а потребляет всего

$$600 + \frac{2\,500}{4} = 1\,225 \text{ ватт,}$$

его коэффициент полезного действия равен

$$\eta = \frac{50}{51,325} = 0,9761 = 97,61\%.$$

Вопрос о величине коэффициента полезного действия при малых нагрузках имеет большое значение для всех электрических машин. Этот вопрос однообразно разрешается для всего электромашиностроения и открывает нам важные перспективы в отношении понимания принципов их действия.

Подобно тому, как у трансформатора рабочее напряжение практически остается постоянным, так и у других машин это напряжение колеблется лишь незначительно; число оборотов, определяющее механические потери, также во время работы почти не меняются. Все электрические машины имеют часть потерь, постоянных, и часть меняющихся в зависимости от нагрузки. Всегда тепловые потери от нагревания током обмоток представляют собой переменную часть, пропорциональную квадрату тока нагрузки.

Предполагая, что коэффициент мощности не меняется при изменении нагрузки и полагая:

N — допускаемая максимальная мощность машины,

xN — любая другая нагрузка,

V_0 — постоянные потери,

$x^2 V$ — переменные потери,

то коэффициент полезного действия будет равен

$$\eta = \frac{x \cdot N}{xN + V_0 + x^2 V}$$

Он получается максимальным, когда

$$x^2 V = V_0$$

т.е. при такой нагрузке машины, когда переменные потери равны постоянным.

В приведенном выше примере максимальный коэффициент полезного действия получается при половинной нагрузке. При безындукционной $1/4$ полной нагрузке коэффициент полезного действия будет только:

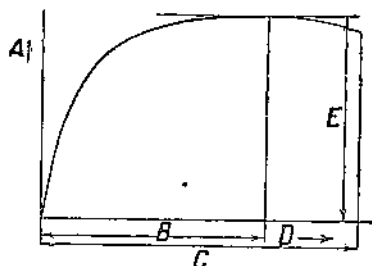


Рис. 21

$$\eta = \frac{25}{25,756} = 0,9706 = 97,06\%.$$

Тем не менее коэффициент полезного действия держится на одном уровне на протяжении большого диапазона нагрузок, как показано на рис. 21 для разобранных в нашем примере трансформатора. Это ценное свойство мы встречаем и у других электрических машин, однако, оно зависит в извест-

ной мере от правильного распределения потерь. Если приходится считаться с малыми нагрузками, то несомненно желательно наибольший коэффициент полезного действия иметь при нагрузке, ниже полной. В этом случае переменные потери превышают постоянные.

12. ГОДОВОЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ. СТРЕМЛЕНИЕ К УДЕШЕВЛЕНИЮ.

Трансформатор больше, чем любая другая машина, подвержен колебаниям нагрузки. Ярче всего это обнаруживается у трансформаторов, питающих световые сети. Большую часть времени они работают почти вхолостую.

В виду этого, вполне правильно распределяют потери так, что потери в меди значительно превышают потери в железе. Вполне оправдываются такие соотношения, как 4:1, и даже 5:1. Потребленная за эксплуатационный год железом энергия при этих условиях лишь немного превышает годовые потери в меди. Годовой коэффициент полезного действия получается совсем иным путем, чем секундный.

К счастью, превышение потерь в меди получается само собой. Учитывая допускаемый намагничивающий ток, мы индукцию в железном сердечнике ограничиваем величиной 13 000 до 14 000 гауссов, в то время как плотность тока в меди зависит только от охлаждающего устройства.

Первые трансформаторы строились для естественного воздушного охлаждения, т.е. они просто находились целиком в воздушной ванне

рабочего помещения. Они допускали в меди только от 1,5 до 1,8 ампера на кв. мм. В виде исключения доходили до 2 ампер/кв. мм.

Скоро, однако, стали опускать трансформатор в масляную ванну. Масло гораздо интенсивней отводит тепло от горячих поверхностей обмотки, чем воздух. К этому добавилось и другое важное обстоятельство, что трансформаторное масло представляет собой гораздо лучший изолятор, чем воздух, благодаря чему оно более подходяще для заполнения промежуточных пространств между обмотками. Масляный трансформатор тотчас позволил довести плотность тока в меди до 3 ампер/кв. мм. Потери в меди начинают превосходить потери в железе. Применение высоко легированного железа с небольшими удельными потерями изменило соотношение между потерями еще больше.

Следует заметить что трудности охлаждения возрастают с увеличением мощности машины. Если увеличить все размеры машины в X раз, то поперечные сечения магнитного потока, которому пропорционально наведенное в витках напряжение, а также сечения обмоток, от которых зависит число нагрузочных ампервитков, увеличатся в X^2 раз. При неизменной плотности магнитного потока в железе и неизменной плотности тока в меди мощность увеличится в X^4 раз.

Потери согласно уравнений (6) и (7) возрастают одинаково с увеличением веса, т.-е., в данном случае, они увеличатся в X^3 раз, в то время как мощность стала в X^4 раз больше. Это обстоятельство проливает свет на тот факт, что более мощные машины работают с более высоким коэффициентом полезного действия.

Охлаждающие поверхности возрастают только пропорционально квадрату размеров машины. Удельная нагрузка поверхности охлаждения выделяющимся из активного железа и меди теплом увеличивается с нагрузкой. Чем крупнее машина, тем затруднительней ее охлаждение.

Масляное охлаждение приходит на помощь в том случае, когда с увеличением мощности естественное воздушное охлаждение уже не достигает цели. Но закон роста остается в силе. В виду этого крупные трансформаторы уже не могут обходиться простым масляным охлаждением. Приходится само охлаждающее масло охлаждать при помощи тока воды. Крупные трансформаторы с водяным охлаждением допускают в меди плотности тока 5 ампер/кв. мм. и выше. Плотность силовых линий в железе остается попрежнему ограниченной величиной намагничивающего тока. В виду этого потери в меди сильно преобладают над потерями в железе.

После того, как мы при помощи вышеприведенных рассуждений убедились в том, что мощность возрастает пропорционально четвертой степени линейных размеров, а веса и потери только пропорционально третьей степени — поскольку окажется возможным при помощи искусственного охлаждения сохранить постоянство удельной нагрузки в железе и меди, — нам станет ясной исключительная важность сосредоточения больших мощностей в одной единице. Вес, приходящийся на единицу мощности, уменьшается с укрупнением машины. Трансформатор мощностью 100 kV весит на 1 kVA около 10 кг, а трансформатор в 20 000 kVA, если он снабжен водяным охлаждением — только 2 кг/kVA.

Однаково с весами возрастают цены и потери. Трансформация при помощи более крупных единиц значительно дешевле, чем при помощи мелких. Этот же закон справедлив, как мы убедимся позже, и в отношении прочих электрических машин. Крупное машиностроение имеет могучий экономический стимул, помогающий сметать все препятствия на пути к постоянному росту сосредоточенной в одной единице мощности.

13. ТРАНСФОРМАТОР ТОКА.

Во всех рассуждениях предыдущих глав при рассмотрении принципа действия трансформатора мы считали само собой разумеющимся, что эффективное значение приложенного к первичной обмотке напряжения остается постоянным.

В самом деле, во всех случаях эксплуатации важно иметь постоянство напряжения. Лампы накаливания, например, хорошо горят только при наличии правильного рабочего напряжения. Но и сам трансформатор весьма чувствителен к непредусмотренному повышению напряжения. Его намагничивающий ток тотчас же непомерно возрастает.

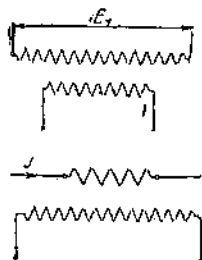


Рис. 22

В подавляющем большинстве случаев к трансформатору подводится напряжение определенной величины. Это значит, что он обычно работает, как трансформатор напряжения. Бывают, однако, случаи, когда к трансформатору подводится ток заданной величины. Образующийся таким образом трансформатор тока должен быть нами также рассмотрен.

Рис. 22 показывает, как в зависимости от схемы, получается или трансформатор напряжения, или трансформатор тока.

Если первичная обмотка включена в цепь таким образом, что она обтекается рабочим током, то она практически не имеет никакого влияния на величину последнего. Сопротивления цепи тока имеют решающее значение по сравнению с собственными сопротивлениями включенной первичной обмотки.

Если нагрузить каким-либо способом вторичную обмотку, например омическим сопротивлением R_2 , то w_2 витков этой обмотки будет обтекать ток I_2 . Приложенная к трансформатору магнитодвижущая сила $I w_1$ совместно с магнитодвижущей силой вторичной обмотки $I_2 w_2$ образует главный магнитный поток, индуктирующий во вторичной обмотке напряжение E_2 .

Удобства ради, пренебрегаем прежде всего собственными сопротивлениями обмоток. Напряжение E_2 , действуя на омическое сопротивление R_2 , остается в фазе со вторичным током I_2 и равняется

$$E_2 = I_2 R_2.$$

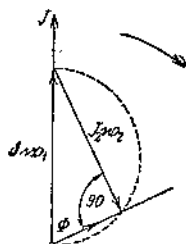


Рис. 24

С другой стороны, вторичное напряжение отстает от главного магнитного потока на $1/4$ периода, отставая тем самым на тот же угол от действующей суммарной намагничивающей силы, образованной совместно намагничивающими силами первичной и вторичной обмоток. Таким образом мы приходим к векторной диаграмме рис. 24. На полуокружности, описанной на векторе приложенной намагничивающей силы $I w_1$, при безиндукционной нагрузке, должен лежать в конце вектора вторичной намагничивающей силы $I_2 w_2$. Сразу можно сказать, что вторичный ток никогда не может превзойти следующей величины

$$I \frac{w_1}{w_2}.$$

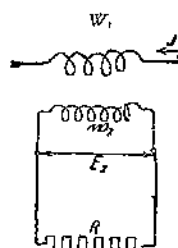


Рис. 23

Векторная диаграмма, представляющая работу трансформатора тока, легко может быть дополнена. Если вторичная обмотка нагружена так, что между напряжением и током устанавливается угол φ , то конец вектора вторичной намагничивающей силы находится на дуге окружности, построенной на векторе приложенной первичной намагничивающей силы, как дуге центрального угла $90 + \varphi$ градусов (рис. 25).

Вследствие этого вторичный ток никогда не может превзойти величины

$$I \frac{w_1}{w_2}.$$

Он будет тем меньше, чем больше вторичное напряжение E_2 , т.е. чем больше нагрузочные сопротивления. При этом можно просто прибавить собственные сопротивления вторичной обмотки к нагрузочным сопротивлениям; собственные сопротивления первичной обмотки не имеют значения, поскольку мы считаем, что они не отражаются на работе первичной цепи. Магнитный поток трансформатора тока, а вместе с ним вторичное напряжение, колеблются в широких пределах, смотря по нагрузке. Интенсивней всего будет магнитный поток при холостом ходе, так как в этом случае он возбуждается всей приложенной намагничивающей силой. Это обстоятельство заставляет выбирать с запасом сечения железа. Трансформатор тока ясно показывает, что намагничивающий ток является лишь вспомогательным допущением. Можно, конечно, и у трансформатора тока разложить приложенную намагничивающую силу $I w_1$ на нагрузочную магнитодвижущую силу

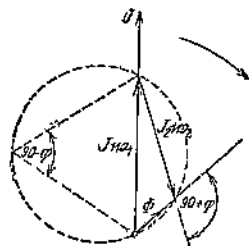


Рис. 25

$$I_1 w_1 = I_2 w_2$$

и на возбуждающую намагничивающую силу $I_m w_1$. Между трансформатором напряжения и трансформатором тока в этом отношении по существу нет никакой разницы. Они представляют собой только частные случаи эксплуатации трансформатора переменного тока. В этом нас тотчас же убеждают векторные диаграммы.

Физически правильной было бы рассматривать главный магнитный поток, как результат одновременного действия намагничивающих сил обеих обмоток. Такое представление привело бы нас скорей к цели не только при рассмотрении принципа действия трансформатора тока, но и при изучении прочих электрических машин.

14. АВТОТРАНСФОРМАТОР.

Весьма замечательным видом трансформатора является автотрансформатор. С первого взгляда он имеет только одну обмотку. Представляя собой и для практики известный интерес, автотрансформатор является важным частным случаем для техники. Представляется далеко не лишним рассмотреть его принцип действия. Вторичное напряжение у обыкновенного трансформатора наводится главным магнитным потоком. Так как в рассматриваемом случае магнитный поток наводит совершенно одинаковые напряжения как в первичной, так и во вторичной обмотке, то вполне возможно использовать наведенные в первичной обмотке напряжения на витках, как вторичное напряжение и, взяв w_2 витков первичной обмотки, которых имеется всего w_1 , получить из них вторичную обмотку (рис. 26).

При холостом ходе не получится, несомненно никаких усложнений. Намагничивающий ток беспрепятственно протекает по w_1 виткам обмотки, а на вторичных клеммах появится напряжение в w_2 раза больше виткового.

При нагрузке трансформатора вторичным током I_2 , электрическое равновесие напряжений не должно быть нарушено. Приложенное напряжение при отсутствии каких-либо падений напряжений должно быть равно w_1 витковых напряжений, как и при холостом ходе. Ток нагрузки I_2 ни в коей мере не должен влиять на главный магнитный поток. Справедливый и для автотрансформатора закон магнитного равновесия приводит нас легко к выводу, что вытекающий из клемм вторичной обмотки ток нагрузки состоит из двух частей: тока I_1 , обтекающего $w_1 - w_2$ витков первичной обмотки, и образующего рабочую первичную намагничивающую силу

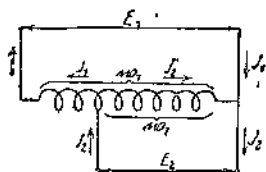


Рис. 26.

и из тока J_2 , который протекает по w_2 виткам общим для обеих обмоток, создавая при этом вторичную намагничивающую силу $I_2^1 w_2$.

Магнитное равновесие будет иметь место, когда

$$I_1 (w_1 - w_2) = I_2^1 w_2,$$

или упрощая

$$I_2 = I_1 + I_2^1 \text{ (рис. 26).}$$

Нетрудно видеть, что частичный ток I_1 переходит без трансформации из первичной обмотки на вторичную. Вместе с тем и мощность $E_2 I_1$ переходит из первичной на вторичную сторону трансформатора, не нагружая вторичной обмотки. На самом деле трансформируется только мощность $E_2 I_2^1$. Таким образом, автотрансформатор отдает такую мощность, которую он, как трансформатор, не усилил бы. Практически ему, конечно, можно приписать полную мощность $E_2 I_2$. Он может быть нагружен в

$$\frac{E_2 I_2}{E_2 I_2^1} = \frac{1}{1 - \frac{w_2}{w_1}} = \frac{1}{1 - \frac{E_2}{E_1}} \text{ раз}$$

больше, чем такой же по величине трансформатор с раздельными обмотками. Очевидно, что автотрансформатор становится тем выгодней, чем меньше разница между первичным и вторичным напряжениями. Колоссальное преимущество имеет автотрансформатор, когда требуется изменить напряжение всего на несколько процентов.

Хотя на первый взгляд кажется, что автотрансформатор всегда предпочтителен, тем не менее при большой разнице напряжений его нельзя совсем применять. Нельзя забывать, что электрическое соединение стороны высокого напряжения со стороны низкого дает возможность доступа опасным блуждающим волнам в низковольтную сеть. Громадное преимущество электрического разделения в трансформаторе обеих обмоток нельзя променять на несколько килограмм меди, которые можно сэкономить при применении автотрансформатора.

Автотрансформатор имеет еще то преимущество, что в нем потери в железе и в меди относятся ко всей кажущейся мощности, а не к действительно трансформированной мощности, которая всегда меньше первой. Намагничивающий ток у автотрансформатора так же меньше, так как он располагает первичными и вторичными витками. Очень небольшие трансформаторы, для которых омическое сопротивление и намагничивающий ток представляют особые трудности, охотно исполняются в виде автотрансформаторов, что иногда является единственным в этом случае выходом.

II. Механизирование трансформации.

15. ИНДУКТИРОВАНИЕ ПРИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ОБМОТКАХ.

Теория трансформатора показывает, что, сцепленный с двумя группами обмоток магнитный поток в состоянии преобразовывать ток в соответствии с нашим желанием. Но такой дважды сцепленный поток может дать еще больше. К нему можно подводить для преобразования не только электрическую энергию, он в состоянии преобразовывать также механическую энергию в электрическую и обратно. Он может, наконец, одновременно преобразовывать и электрическую и механическую энергию в электрическую; посредством магнитного потока можно получить значительно более универсальную трансформацию, чем мы это имели в железном сердечнике простого трансформатора переменного тока.

Если, подводя к трансформатору напряжение постоянного эффективного значения, мы будем в то же время уменьшать число периодов этого напряжения, то этим самым будет уменьшаться периодичность всех переменных величин в трансформаторе, в том числе и магнитного потока. Число силовых линий магнитного потока должно возрасти, чтобы поддержать электрическое равновесие в первичной обмотке, так как эффективное значение наведенного магнитным потоком напряжения пропорционально периодичности потока. Условия работы потока становятся тяжелее.

Таким образом нужно постепенно уменьшать также и величину эффективного значения подводимого напряжения, если хотят иметь магнитный поток заданного максимального числа силовых линий. В этом случае с уменьшением периодичности одновременно падает и трансформируемая мощность. Наконец, если переменный магнитный поток превратить в постоянный, т.-е. если считать, что к первичной обмотке подводится постоянное напряжение, то мы не получим уже больше никакой трансформации; приложенное постоянное напряжение гонит через омическое сопротивление первичной обмотки намагничивающий ток, который, конечно, теперь является током постоянным. Электрически застывший таким образом трансформатор можно своеобразно оживить, не изменяя при этом ничего на первичной стороне и не заставляя снова изменяться постоянный магнитный поток. Мы можем получить от такого застывшего потока особым способом напряжения во вторичной обмотке, которую, простоты ради, представим себе состоящей из одного витка.

Заставим вторичную обмотку вращаться вокруг оси таким образом что через известный промежуток времени она повернется на угол α относительно своего первоначального положения (рис. 27). Теперь обмотка оставляет магнитному потоку меньшее проходное отверстие; если раньше

через нее проходили все Φ_0 силовых линий, то теперь, предполагая равномерное распределение силовых линий, через обмотку проходят только $\Phi_0 \cos \alpha$ силовых линий. По отношению к вращающейся вторичной обмотки магнитный поток снова стал изменяться.

Пусть вторичная обмотка вращается с постоянной угловой скоростью ω_m (сек. — 1); отсчет времени t будем вести с того момента, когда обмотка занимала первоначальное положение, и движение только начиналось. Тогда мы имеем

$$\alpha = \omega_m t.$$

Проходящий через обмотку поток изменяется по следующему закону

$$\Phi = \Phi_0 \cos \omega_m t.$$

Согласно закона индукции, поток наводит напряжение

$$E_{2t} = - \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} = \omega_m \cdot \Phi_0 \cdot 10^{-8} \sin \omega_m t.$$

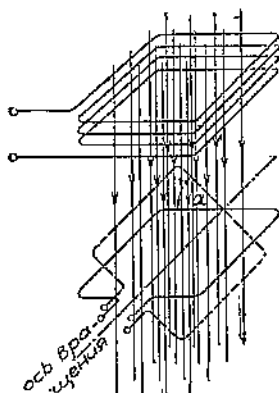


Рис. 27

Этим заканчивается механизирование в электрическом отношении бездействовавшего трансформатора. Вторичная обмотка снова обрела напряжение, она снова в состоянии посылать ток в сопротивление потребителя. Выбором надлежащего числа витков мы можем подобрать нужную величину напряжения, а правильную периодичность мы получим при скорости вращения, соответствующей правильно выбранной угловой скорости.

Периодичность вторичного напряжения устанавливается чисто механическим путем. Первичная обмотка ни в коей мере не влияет на нее. Механическая угловая скорость одновременно является и электрической; подлинной первичной стороной механизированного трансформатора, таким образом, служит еще неизвестный нам источник механической энергии.

До тех пор пока вторичная обмотка не нагружена, последняя не отдает энергии, следовательно источник механической энергии нам пока не нужен. Но является совершенно очевидным, что при наступлении нагрузки, отдаваемая энергия не может быть взята из первичной обмотки. Магнитный поток больше не имеет возможности способствовать принятию энергии. Оживлявшее трансформатор переменного тока электрическое равновесие приложенного напряжения и напряжения, наведенного магнитным потоком, в электрически застывшей обмотке постоянного тока уже больше не имеет смысла. Назначением первичной обмотки является теперь только возбуждение магнитного потока, что не может быть, разумеется, механизировано.

Механическо-электрическая трансформация нуждается в видоизменении некоторых положений и представлений из теории чисто электрической трансформации для того, чтобы создать простую и наглядную теорию вращающихся электрических машин. Прежде всего это касается закона индукции, который также возможно механизировать. Начнем поэтому с видоизменения закона индукции.

16. ЗАКОН ИНДУКЦИИ ДЛЯ ВРАЩАЮЩИХСЯ ОБМОТОК.

В магнитном потоке, содержащем Φ_0 силовых линий, поставим перпендикулярно направлению силовых линий обмотку: сделаем так, чтобы

последняя, все время представляя прямоугольник, имела одну подвижную сторону (рис. 28). Первоначальное отверстие обмотки пронизывается потоком постоянной равномерной плотности B .

Начнем теперь двигать подвижную сторону обмотки со скоростью v см/сек. (рис. 28). Согласно принятых предположений, отверстие обмотки начнет уменьшаться при этом в промежуток времени dt на

$$l \cdot v \cdot dt \text{ кв. см.},$$

если подвижная сторона обмотки имеет длину l см; пронизывающий обмотку магнитный поток уменьшится за это время на

$$B \cdot l \cdot v \cdot dt \text{ силовых линий.}$$

Согласно закону индукции в витке появится напряжение.

$$E_t = \frac{B \cdot l \cdot v \cdot dt}{dt} \cdot 10^{-8} = B \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8} \text{ вольт. . (9)}$$

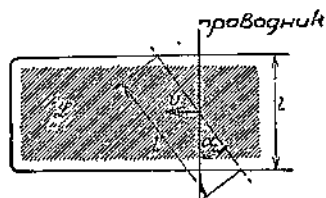


Рис. 28

Это напряжение в витке безусловно останется тем же и при изменении формы обмотки, лишь бы продолжалось движение стороны витка; необходимым условием для этого является, чтобы сторона витка длиной l см перерезала со скоростью v направленные перпендикулярно движению силовые линии, плотностью B . Явление индукции мы должны искать только в подвижной стороне витка; следовательно нам нужен больше не весь виток, а только подвижной проводник. Мы переходим от понятия напряжения в витке к понятию напряжения в стержне.

Из вывода механизированного закона индукции с очевидностью следует, что мы ничего не выиграем, если на рис. 28 поставим проводник наклонно под углом α к первоначально выбранному направлению с целью сделать его длиннее. При передвижении проводника мы должны считаться с проекцией его на перпендикулярное движению направление; согласно рис. 28 закон индукции нужно было переписать следующим образом

$$E_t = B \cdot v \cdot l' \cdot \cos \alpha \cdot 10^{-8} \text{ вольт.}$$

Если мы возьмем наиболее общий случай, когда магнитный поток распределен неравномерно, следовательно плотность силовых линий B переменна и, кроме того, каждый элемент длины dl проводника имеет разный угол наклона α , то мы должны пользоваться уравнением

$$E_t = \int_0^l B \cdot v \cdot \cos \alpha \cdot dl \cdot 10^{-8} \text{ вольт.}$$

В электромашиностроении, конечно, работают исключительно с углом $\alpha = 0$,

так как при этом условии получаются наиболее короткие стержни. Кроме того, в наших конструкциях плотность силовых линий на протяжении всей длины проводника постоянна. В теории машин поэтому пользуются законом механизированной индукции в простейшей его форме, выраженной формулой (9).

Направление магнитного потока, движение и напряжение на стержне образуют в наших машинах всегда пространственную прямоугольную систему координат. Представляется, однако, необходимым для определения

направления напряжения на проводнике дать еще особое правило. Без этого правила выбор между двумя возможностями нельзя было бы сделать.

Правило правой руки вполне достаточно для практики. Если поставить правую руку так, чтобы силовые линии входили в ладонь, а большой палец указывал бы направление движения, то остальные пальцы покажут направление наведенного напряжения.

Дальнейшее покажет, что закон направлений нелишне будет несколько уточнить. Движение проводника, как всякое движение, относительно. Подразумевается при этом, конечно, относительное движение по отношению к находящемуся в покое магнитному потоку. Если же проводник находится в покое, то, очевидно для сохранения прежнего направления напряжения, должен двигаться в противоположном направлении магнитный поток. Следовательно, большой палец правой руки должен быть поставлен так, чтобы он показывал относительное движение проводника по отношению к магнитному потоку. Закон механизированной индукции даст нам весьма простую возможность претворить в жизнь в конструктивных формах ранее описанное механизирование трансформатора. Разумеется, прежде нужно создать для магнитного потока удобный путь в железе. В виду этого мы накладываем стержень, представляющий теперь для нас вторичную обмотку, на цилиндрический железный барабан, который может вращаться вокруг своей оси. Неподвижная часть модели служит только для придания магнитному потоку желательного направления (рис. 29).

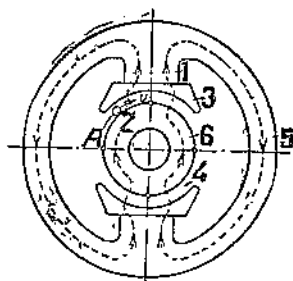


Рис. 29

Чтобы стержень имел возможность двигаться, между покоящейся и вращающейся частями модели должен быть оставлен воздушный зазор. На рис. 29 ясно видно, каким конструктивным приемом достигается возможность обратного замыкания магнитного потока. Возбуждающую первичную обмотку, охотно помещают на суженные части неподвижного железного сердечника, чем достигается более короткая длина витков, а следовательно экономия меди. Часто этим полюсам придают круглое сечение, так как круг при той же площади имеет меньший периметр. В виду этого полюсы снабжают полюсными башмаками, назначение которых расширить стесненный в самих полюсах магнитный поток. Тем самым создаются лучшие условия для прохождения потока через воздушный зазор.

Легко убедиться в том, что неподвижную часть железного сердечника совсем не требуется набирать из отдельных листов; она может быть отлита из целого куска. Постоянный магнитный поток не знает ни явления перемагничивания и явления вихревых токов. Но вращающаяся часть железного сердечника, так называемый якорь, должна состоять из отдельных листов. Как легко видеть, в этой части магнитный поток изменяет направление; постоянный магнитный поток для якоря превращается в переменный.

Силовые линии выступают из железа неподвижной части остова магнитов повсюду перпендикулярно поверхности железа; под таким же углом силовые линии входят в железо якоря. В построенной модели имеются все предпосылки для применения простой формулы (9). Само собой понятно, что активной длиной стержня надлежит считать, только ту его часть, которая в самом деле пересекает силовые линии.

17. КОНТАКТНЫЕ КОЛЬЦА. СИЛА ТОКА. БАЛАНС ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ.

Простая модель вращающейся электрической машины, которую мы набросали в предыдущей главе и изобразили на рис. 29, должна быть дополнена одной конструктивной деталью, а именно, приспособлением, которое позволило бы отводить электрический ток от находящейся на якоре вторичной обмотки.

Когда нам нужно использовать напряжения стержня во внешней цепи мы сталкиваемся с затруднением, заключающемся в том, что стержень движется, в то время как внешняя цепь находится в покое; в виду этого непосредственное соединение стержня с внешней цепью невозможно.

Оба конца стержня необходимо вывести при помощи клемм вторичной обмотки и соединить с металлическими кольцами, помещенными на валу якоря и вращающимися одновременно с ним. Если установить затем на поверхности колец неподвижные контакты, так называемые щетки, то мы получим требуемое электрическое соединение.

Контактные кольца представляют собой часто применяющуюся в электрических машинах конструктивную деталь. Они служат всегда для электрического соединения неподвижных и вращающихся точек. При тщательном исполнении они выполняют свою задачу безукоризненно. Только теперь, после того как мы нашу модель машины приспособили для приема нагрузки, мы можем начать изучение происходящих при нагрузке явлений. При этом мы можем ограничить наше рассмотрение прохождением энергии в течение произвольно малого отрезка времени, так называемого дифференциала времени.

В течение произвольно выбранного дифференциала времени, согласно рис. 28, стержень пересекает со скоростью v см/сек. силовые линии плотностью B гауссов на длине l см, измеренной в направлении, перпендикулярном движению. Напряжение на концах стержня достигает величины:

$$E_{2t} = B \cdot v \cdot l \cdot 10^{-8} \text{ вольт.}$$

При расположении по рис. 29 напряжение направлено из-за плоскости рисунка. Такое же направление имеет вторичный ток нагрузки I_{2t} , если напряжение включено на омическое сопротивление.

В течение дифференциала времени dt машина отдает количество электрической энергии.

$$E_{2t} \cdot I_{2t} \cdot dt \text{ ватт секунд.}$$

Первичный поток не может почерпнуть эту энергию из первичной сети. Она должна быть подведена в виде механической энергии к валу якоря. Как это происходит, мы еще должны установить.

Обтекаемый ток I_{2t} стержень находится, согласно наших предположений, в потоке плотности B . По закону Био-Саварра между электрическим током и магнитным потоком возникает усилие пропорциональное длине находящегося в магнитном потоке проводника, плотности тока в этом проводнике, силе тока и синусу угла между потоком и током.

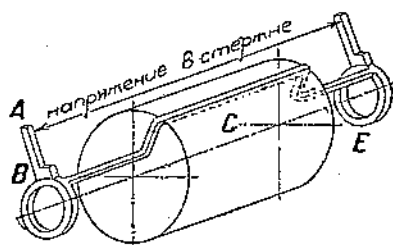


Рис. 30

В общем виде, соответствующему рис. 31, мы должны пользоваться формулой:

$$P = \int_0^l B \cdot I \cdot \sin \alpha \cdot dl \cdot 10^{-1} \text{ дин}, \quad \dots \dots \dots (10)$$

где

B — в гауссах,
 I — в амперах,
 l — в см.

В электрических машинах всегда

$$\alpha = 90^\circ;$$

плотность же силовых линий вдоль всего стержня одинакова. В виду этого получаем следующую упрощенную формулу

$$P = B \cdot I \cdot l \cdot 10^{-1} \text{ дин}, \quad \dots \dots \dots (10a).$$

Направление потока, тока и механической силы снова образует прямоугольную пространственную систему координат. В этом случае применяется нижеследующее правило левой руки.

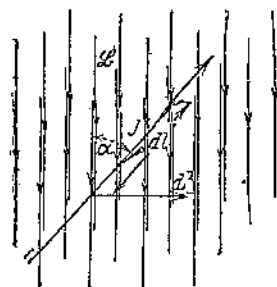


Рис. 31.

Если мы поставим левую руку таким образом, что силовые линии будут входить в ладонь, а пальцы будут указывать направление тока, тогда большой палец даст направление силы, с которой взаимодействует друг с другом магнитный поток и ток.

При расположении по рис. 28 ток нагрузки протекает в плоскости рисунка, так как вызвавшее его напряжение имеет это же направление. Обтекаемый потоком стержень, согласно уравнению (10-a), подвержен усилию

$$P = B \cdot I_{2t} \cdot l \cdot 10^{-1} \text{ дин},$$

которое направлено прямо противоположно направлению движения. Это усилие должно быть преодолено равным ему по величине окружным усилием, приводящим в движение якорь; следовательно, должна подводиться механическая энергия равная за рассматриваемый промежуток времени

$$B \cdot w \cdot dt = B \cdot I_{2t} \cdot l \cdot v \cdot 10^{-1} dt \text{ эргов.}$$

Сразу видно, что баланс энергии будет соблюден, если будет соблюдено равенство

$$I_{2t} \cdot E_{2t} dt \text{ ватт секунд} = P v dt \text{ эргов.}$$

Так как в проведенном выше исследовании машина отдавала электрическую энергию и потребляла механическую то, следовательно, она действовала, как генератор электрического тока. Наведенное напряжение не уравновешивается, но возникающее окружное усилие должно быть преодолено из вне приложенным окружным усилием. Можно описанный рабочий процесс перевернуть. Можно к стержню подводить напряжение, прямо противоположно направленное и по величине равное наведенному напряжению. Мы можем заставить протекать ток в обратном направлении; при этом и окружное усилие изменит свой знак и будет приводить якорь в движение. Машина начнет отдавать механическую энергию, потребляя, при этом электрическую. Иными словами, она будет работать как мотор-

В этом случае окружное усилие ничем не уравновешено, а наводимое напряжение преодолевается приложенным извне напряжением.

Ни генератор, ни мотор не работают идеально. Окружное усилие приложенное к генератору, должно быть несколько больше получающегося в машине окружного усилия, так как оно должно компенсировать потери на трение; кроме того, омическое сопротивление якорного стержня вызывает падение напряжения. У мотора приложенное напряжение должно, кроме напряжения в стержне, преодолеть еще падение напряжения в последнем; следовательно, оно должно быть выше напряжения в стержне. Усилие частью расходуется на преодоление вредных сопротивлений, от которых никакая машина не свободна.

Двойственный принцип работы электрической машины, как генератор и мотор, не является особенностью только механизированного трансформатора, чуждой чисто электрическому трансформатору. Можно перевернуть также и процесс работы трансформатора переменного тока. Прилагая напряжение во вторичной обмотке, мы тем самым подводим к ней энергию, отводить которую должна будет первичная обмотка. Проще говоря, обе трансформаторные обмотки могут во всякое время обменяться ролями.

Но при электрической трансформации мы всегда имеем дело с преобразованием электрической энергии в электрическую же. Перевертывание рабочего процесса не приносит ничего нового.

Из предшествовавшего исследования и на основании подсчетов можно убедиться в том, что первичная обмотка машины не принимает участия в преобразовании энергии. Она только поддерживает магнитный поток. Очевидно также, что именно магнитный поток выполняет работу по трансформации энергии. Он наводит в якоре напряжение, он механически действует на стержень якоря.

Уже сейчас можно догадываться, что магнитный поток может трансформировать одновременно и электрическую и механическую энергию. Трансформатор переменного тока и рассмотренная нами упрощенная модель машины были только частными случаями; между электрической и механической трансформацией следует искать всеобщую трансформацию.

18. НАВЕДЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ. ПЕРИОДИЧНОСТЬ И ЧИСЛО ПОЛЮСОВ.

Упрощенная модель вращающейся электрической машины, которую мы получили при механизировании трансформации, нуждается в основательной переработке, прежде чем ее можно будет применить на практике. Пока мы знаем только один момент в ее работе, а именно, что в любое время эксплуатации происходит известный уже нам обмен энергии. Но далее мы легко обнаружим ряд недостатков, которые, однако, будучи вскрыты, могут быть устранены. Напряжение на стержне готово к реализации. Но как оно выглядит? Как оно изменяется во времени? Стержень является безусловно лишь краеугольным камнем обмотки якоря. Он не может быть единственным на окружности якоря. Мы заложили стержни по всей наружной поверхности цилиндра якоря, подобно тому, как у трансформатора мы заполняли все свободное место обмоткой. Но каким же образом из отдельных стержневых напряжений составляется суммарное напряжение?

Стержневое напряжение в каждый момент пропорционально плотности силовых линий в месте нахождения в этот момент стержня. Таким образом, изменение напряжения во времени определяется распределением плотности магнитного потока по окружности якоря.

В нормальной эксплуатации якорь вращается с равномерной угловой скоростью. Активная длина якорного стержня остается на протяжении одного оборота постоянной. Следовательно, плотность пересекаемых силовых линий является единственным фактором, определяющим величину стержневого напряжения. Если мы нанесем плотности тока на развернутой окружности якоря, при чем будем считать положительным, входящим в якорь поток, а выходящий, — отрицательным, то получим, вообще говоря, неправильную волнообразную линию, как показано на рис. 32. Эта кривая распределения плотности силовых линий в то же время представляет собой кривую изменения стержневого напряжения по времени.

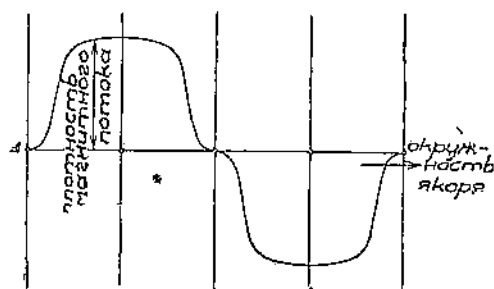


Рис. 32.

В первом случае абсциссы представляют собой расстояние по окружности якоря, отсчитываемое от точки А; во втором случае же абсцисса дает время, за которое стержень проходит указанное расстояние. В одном случае длина окружности служит длиной волны, а в другом — изображает время одного оборота или, другими словами, длительность одного периода напряжения в стержне.

Это положение говорит за то, что наша упрощенная модель машины весьма далека от совершенства. Мы охотно пользуемся переменными напряжениями, но нам требуется, чтобы они были синусоидальными. Мы не можем довольствоваться напряжением, изменяющимся по произвольно установившейся форме кривой. Очевидно, необходимо принять меры к тому, чтобы плотность магнитного потока распределялась синусоидально по окружности якоря. Нелегко решать подобную задачу. Магнитный поток распределяется в соответствии с магнитным сопротивлением. Поэтому кривая распределения сопротивлений по окружности якоря должна быть как можно ближе к синусоиде.

Воздушный зазор является действительным средством в руках конструктора. Начиная от середины полюса, зазор должен постепенно увеличиваться, как показано на рис. 33. Вот, где лежит путь к поставленной нами цели. В воздушном зазоре сосредоточена большая часть всего магнитного сопротивления магнитного тока, так что он оказывает решающее влияние на пространственное распределение плотности силовых линий.

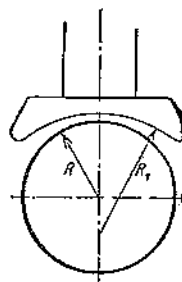


Рис. 33

Из всего сказанного следует, что полюсный башмак является весьма существенной частью железного остова машины. Его форма должна быть тщательно подобрана. При надлежащей форме мы получим практически синусоидальное напряжение на стержне. Но мы сталкиваемся еще с одной на первый взгляд незаметной трудностью при получении напряжения в стержне. Длительность одного периода напряжения определяется продолжительностью одного оборота якоря. Периодичность жестко связана с числом оборотов машины.

Не все возможные числа периодов применяются в технике сильных токов. Во всей Европе преобладает 50 периодов в секунду. Только для электрической тяги применяют $16\frac{2}{3}$ периода. Мы не должны, конечно, забывать о том, чтобы пожертвовать этим весьма важным для

практики единством. С другой стороны, мы не можем все машины заставить вращаться с числом оборотов 3000 в минуту.

Генераторы переменного тока приводятся в движение водяными турбинами, паровыми машинами, двигателями внутреннего сгорания или, наконец, паровыми турбинами. Мы должны считаться с наименьшим и наибольшим числом оборотов этих машин, так как построить перечисленные машины на однообразное число оборотов нельзя. Мы могли бы, конечно, для получения нужного числа оборотов прибегнуть к соответствующей переменной или зубчатой передаче.

Механическое изменение числа оборотов дает решение выше поставленной задачи; ременная и зубчатая передачи встречаются и по сие время. Но это не является идеальным решением. Надежность эксплуатации требует непосредственного соединения машины-двигателя с приводимым в движение генератором. Надежность эксплуатации настолько существенна, что пришлось искать пути к уменьшению зависимости числа периодов от числа оборотов. В результате этого получились многополюсные типы машин. Понятно, что наведенное напряжение будет иметь в течение

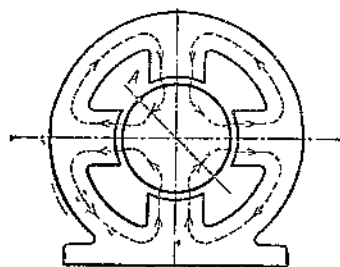


Рис. 34

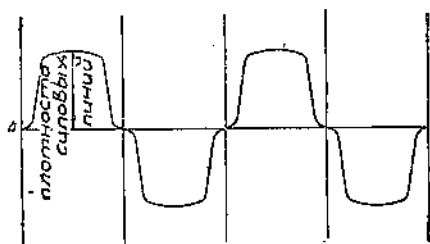


Рис. 35

одного оборота несколько периодов, если магнитный поток будет по окружности якоря несколько раз входить и выходить из него. Четырехполюсная модель, изображенная на рис. 34, может быть легко осуществлена: плотность магнитного потока вдоль окружности якоря изобразится в этом случае кривой, показанной на рис. 35; сообразно этому кривая напряжения в стержне будет иметь два периода в течение одного оборота. Не представляет никаких трудностей построить машину на 10, или даже на 60 полюсов. Каждый паре полюсов соответствует один период за каждый оборот. В общем виде мы можем написать следующую зависимость число периодов (f сек.⁻¹) от числа оборотов в минуту n машины и числа полюсов p

$$f = \frac{p \cdot n}{120} \dots \dots \dots (11)$$

Быстроходная паровая машина стала проникать в область электромашиностроения со стороны максимальных чисел оборотов. Она спаривается с двухполюсными генераторами на 3000 оборотов в минуту и четырехполюсными на 1500 оборотов. Паровые машины и двигатели внутреннего сгорания, наоборот, нуждаются в большом количестве полюсов.

Легко убедиться в том, что машина при заданной мощности будет дешевле при большем числе оборотов; если, например, удвоить число оборотов готовой машины, то этим самым мы удвоим наводимое напряжение, а также число периодов. При этом ток нагрузки можно не уменьшать. Даже, наоборот, чем быстрее вращается якорь, тем лучше он

охлаждается. Таким образом, при удвоении числа оборотов одновременно удваивается и мощность машины.

Поэтому понятно желание строить генераторы на возможно большее число оборотов. Но это стремление наталкивается на малое число оборотов машин-двигателей. Таким образом паровая турбина приобретает особое значение для электротехники. По этой же причине построение водяных турбин стремится идти по пути максимально возможного увеличения числа оборотов.

Когда идут на непосредственное соединение тихоходных паровых машин и двигателей внутреннего сгорания с дорогими четырехполусными генераторами, то это показывает, что в этом случае надежности эксплуатации придают исключительно важное значение. В памяти эксплуатационного инженера еще свежи неприятные воспоминания из младенческих лет электротехники с ее ненадежными ременными и канатными передачами. Более мелкие генераторы еще и по сие время часто строятся на большое число оборотов и работают от ременного привода. Это происходит из желания уменьшить первоначальные затраты. Ременный привод при небольших мощностях имеет право на существование; но он не должен внедряться в такие установки, где можно ожидать больших окружных усилий, и где любой солидный толчок может остановить генератор.

19. КРИВАЯ НАПРЯЖЕНИЙ. ВЫСТУПАЮЩИЕ ПОЛЮСЫ. РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ОБМОТКА ВОЗБУЖДЕНИЯ.

Форма кривой напряжения, наводимого в генераторе переменного тока, приобретает особое значение, если учесть ее влияние на работу телефонных сетей. Очень часто параллельно проложенные провода сильного тока и телефонные кабели находятся друг от друга на небольшом расстоянии, отчего сильный ток наводит нежелательные слабые токи в телефонном кабеле. При этом основная 50-периодная волна мешающего звука волнам высшего порядка с их близкой к звуковым волнам периодичностью становятся неприятными.

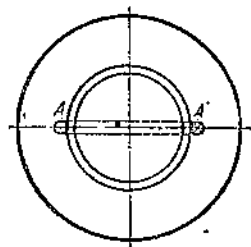


Рис. 36

Синусоидальное распределение плотности силовых линий по окружности якоря является весьма важной деталью вращающейся электрической машины. Это обстоятельство настолько важно, что найденного в предыдущей главе способа недостаточно. Мы должны для достижения поставленной цели искать других путей.

Силовые линии магнитного потока распределяются на отдельные пучки, которые, проходя параллельно, пересекают воздушный зазор на окружности якоря в различных местах. У модели машины с выступающими полюсами, с которой мы до сих пор имели дело, все пучки силовых линий возбуждаются одинаково, а именно: намагничивающей силой находящейся на полюсах первичной обмотки; но эти пучки преодолевают различные магнитные сопротивления, если воздушный зазор сделан различным в разных точках окружности якоря.

Вместо того, чтобы наводить одинаковые пучки силовых линий и создавать для них различные сопротивления, можно добиться того же

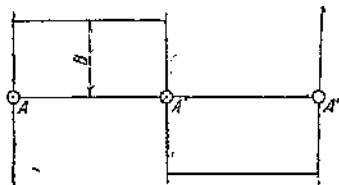


Рис. 37

результата, оставив магнитное сопротивление по окружности якоря постоянным и изменив, наоборот, надлежащим образом возбуждение. Это вторая возможность имеет большое значение в теории электрических машин. Мы должны ее рассмотреть подробнее.

Легко убедиться в том, что постоянство магнитного сопротивления по окружности якоря может быть достигнуто исключительно постоянством воздушного зазора по всей длине окружности якоря. При этом, конечно, выступающие полюсы должны отпасть; неподвижный магнитный остов превращается в железное кольцо, в отверстие которого вставляется железный цилиндр (рис. 36).

В целях более легкого изучения пространственно распределенного возбуждения, мы не станем снабжать внутреннюю окружность остова неявными полюсами; наложим на внутреннюю окружность остова диаметрально обмотку подобно тому, как мы раньше накладывали стержни на наружную окружность цилиндра якоря. Рис. 36 показывает, каким образом будет поставлен наш первый опыт.

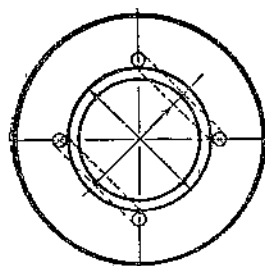


Рис. 38

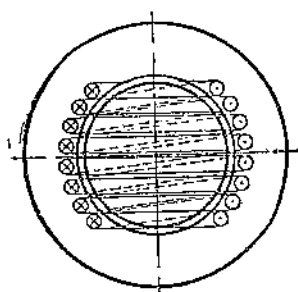


Рис. 39

Постоянный ток возбуждения протекает теперь через единственный взятый нами виток первичной обмотки и наводит магнитный поток, плотность силовых линий которого распределяется по кривой рис. 37, так как, согласно нашему допущению, магнитное сопротивление кругом постоянно. Магнитный поток получится двухполюсный. Он превратится в четырехполюсный, если мы переделаем обмотку возбуждения, как показано на рис. 38. В обоих случаях кривая распределения плотности силовых линий еще неудовлетворительна; ее форма еще весьма далека от желательной нам синусоиды.

Всякий следующий добавляемый нами виток возбуждения с меньшим отверстием (рис. 39) будет, конечно, усиливать магнитный поток. Но эти витки будут сказываться лишь на той части магнитного потока, которую они будут охватывать.

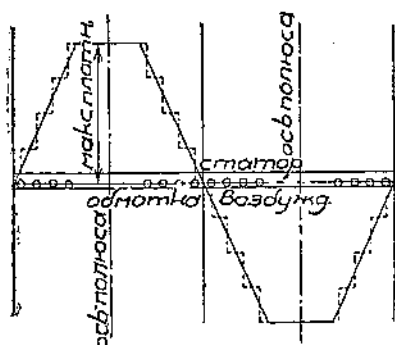


Рис. 40

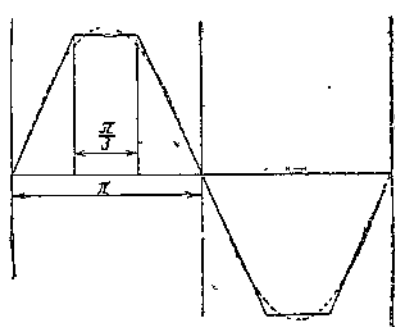


Рис. 41

Распределенная обмотка возбуждения создает ступенчатый магнитный поток, возрастающий по направлению к оси полюса (рис. 40); наконец, при достаточно равномерном распределении обмотки мы получим трапециoidalную кривую пространственного распределения плотности силовых линий.

Трапецидальная кривая превратится в треугольник, если мы покроем сплошь витками всю окружность магнитного остова. Распределенную обмотку возбуждения машин мы мыслим всегда такой, что она не покрывает всей окружности неподвижного магнитного остова — статора, — в результате чего получается трапецидальная кривая. Последняя с успехом заменяет желательную нам синусоидальную

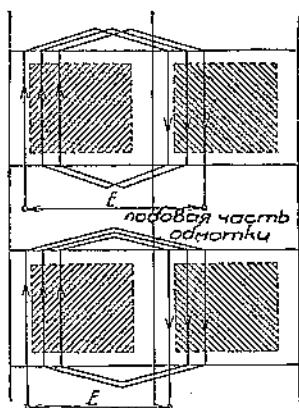


Рис. 42 и 43

кривую (рис. 41) особенно, когда, оставляют без обмотки треть окружности статора. В машинах переменного тока мы будем всегда встречаться с трапецидальными потоками и будем рассматривать их, как синусоидальные.

Для теории магнитных потоков, возбуждаемых распределенной обмоткой, весьма важно подчеркнуть одно, собственно говоря, само собой разумеющееся обстоятельство, а именно, что эти потоки могут наводиться равными по величине, но пространственно сдвинутыми, как показано на рис. 42, витками. Обе обмотки рис. 42 и рис. 43 совершенно равнозначущи.

Обмотка возбуждения у машин с неявно выраженными полюсами состоит также из соединенных между собой стержней. Распределенная обмотка возбуждения, таким образом, указывает нам путь, как получить из отдельных проводников обмотку. Отметим это обстоятельство именно здесь вполне уместно, так как теперь, после рассмотрения вопроса о наведении напряжения на проводнике, мы можем перейти к изучению обмотки якоря.

20. ОБМОТКИ ЯКОРЯ.

Якорь с одним единственным стержнем на своей окружности в действительности не существует. Если можно поместить на наружной поверхности якоря один стержень, то, конечно, нет никаких препятствий для размещения на ней большого числа стержней. Мы стремимся к использованию материалов, а потому нужно стараться поместить на поверхности якоря как можно больше стержней.

Стержни лежат не просто свободными на якоре, как мы до сих пор предполагали, рассматривая принцип действия упрощенной модели. Так делать нельзя по многим соображениям. Прежде всего для такого размещения потребовался бы слишком большой воздушный зазор, особенно у машин с неявно выраженными полюсами, у которых бы выдавались в воздушный зазор еще стержни обмотки возбуждения; в крайнем случае, мы могли бы применить небольшое количество плоских стержней с небольшим суммарным поперечным сечением, от чего бы, конечно, сильно пострадала мощность машины.

Далее, центробежная сила представляет угрозу для стержней, лежащих просто на поверхности якоря. У быстроходных больших машин окружная скорость доходит до 100 м/сек. и даже больше. Обмотка якоря должна быть весьма основательно закреплена. Мы вырезаем в железе якоря пазы, вставляем в них стержни и прикрываем пазы прочным клином, как показано на рис. 44.

Обмотка статора также закладывается в пазы, если она, как это бывает при распределенной обмотке возбуждения, должна помещаться вблизи воздушного зазора. В принципе действия машины с заложенными

в пазах стержнями абсолютно ничего не меняется. Радially расположенные друг над другом стержни вращаются с различной скоростью. Зато магнитный поток, проходя в якорь радially, увеличивает свою плотность по направлению к оси якоря. Плотность потока возрастает в такой же мере, в какой уменьшается скорость стержней.

Между пазами остаются зубцы железа якоря, по ним магнитный поток переходит из статора в якорь, или, как говорят еще, — ротор. Само собой понятно, что нельзя слишком ослаблять сечение зубцов, во избежание чрезмерной плотности силовых линий в них. Теперь не идут выше 20 000 гауссов в железе зубцов, в то время, как раньше доводили почти до 30 000 гауссов.

Кроме того, из чисто электрических соображений мы не можем довольствоваться напряжением только одного стержня. Оно просто слишком мало. Например: если мы возьмем стержень длиной 1 м при окружной скорости якоря 100 (секундометров) и при максимальной плотности потока 10 000 гауссов, то мы получим амплитудное значение стержневого напряжения равным

$$E_{\max} = 10.000 \cdot 100 \cdot 10^2 \cdot 10^3 \cdot 10^{-8} = 100 \text{ вольт,}$$

а эффективное = 70 вольт.

Мы должны поэтому соединять последовательно стержни якоря; для получения якорной обмотки мы должны заложить в якорь множество стержней. Суммарное напряжение обмотки якоря во много раз превышает напряжение отдельного стержня.

Задача обмоток переменного тока заключается в том, чтобы добиться сложения напряжения отдельных проводников. В общем нужно сказать, что здесь дело обстоит сложнее, чем в обмотках трансформатора.

Витковые напряжения трансформаторной обмотки все равны по величине и совпадают по фазе. Эти напряжения складываются при простом последовательном соединении витков. Правда, напряжения на проводнике обмотки якоря также равны между собой, но зато они сдвинуты по фазе друг относительно друга. Их нельзя арифметически складывать при последовательном соединении. Рассмотрим два стержня, расположенные по окружности якоря и сдвинутые по отношению друг к другу на угол α (рис. 45).

Напряжения обоих стержней изменяются по одной и той же кривой пространственного распределения плотности силовых линий; они подвержены одинаковым механическим воздействиям, имеют одну и ту же форму кривой, одинаковую периодичность, но двигающийся вперед стержень начинает первым свою волну напряжений, а второй стержень делает это на

$$t = \frac{\alpha}{\omega_m} \text{ сек.}$$

позднее (ω_m — угловая скорость якоря). Геометрическому углу α соответствует равный ему угол сдвига фаз напряжений (рис. 46).

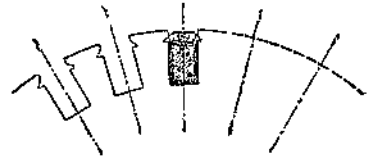


Рис. 44

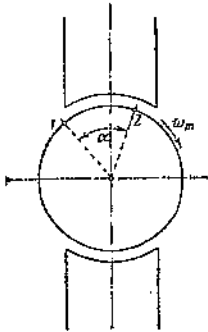


Рис. 45

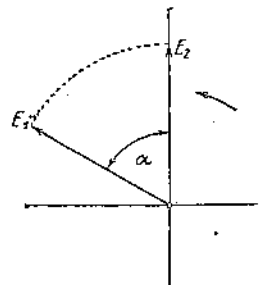


Рис. 46

У многополюсных машин при p полюсах пространственному углу в

$$\frac{360}{\frac{p}{2}} \text{ градусов}$$

соответствует полный период. Пространственный угол α в этом случае в электрическом отношении пропорционален углу

$$\varphi = \frac{\alpha \cdot p}{2}.$$

На двухполюсном якоре оба стержневых напряжения противоположны по фазе, если они отделены друг от друга половиной окружности якоря; при четырехполюсном якоре то же самое происходит при размещении стержней на расстоянии четверти окружности.

21. НАПРЯЖЕНИЕ ОБМОТКИ.

В обмотке якоря соединяются стержни, а в трансформаторной обмотке — витки. Концы витков всегда находятся рядом, так как после того, как виток сделает один оборот вокруг магнитного потока, его конец сам собой переходит в начало. Концы же стержней находятся по разные стороны якоря. Соединительные провода обмотки якоря играют большую роль, чем соединительные провода обмотки трансформатора.

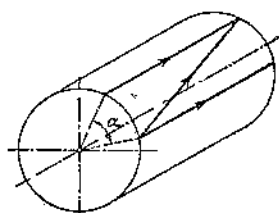


Рис 47

Можно было бы соединить последовательно два тесно рядом лежащих на якоре стержня, так как оба стержневых напряжения весьма незначительно сдвинуты по фазе и складываются почти чисто арифметически. Но для осуществления этой идеи мы должны соединить конец одного стержня с началом другого, иными словами, мы должны проложить такой соединительный провод, который будет занимать такое же положение на якоре, как и сами стержни.

Но не одно только соображение о том, что соединительные провода напрасно занимают полезное место на якоре, бракует этот наш первый опыт соединения.

Соединительный провод так же, как стержни пересекает силовые линии; в них также несомненно будет наводиться напряжение. Одного взгляда на рис. 47 достаточно, чтобы сказать, что два стержня совместно с соединительным проводом создадут только одно напряжение. Два напряжения на стержне при таком соединении направлены прямо противоположно, а потому друг друга компенсируют.

Теория обмоток якоря может почерпнуть из этого неудачного опыта одно основное правило: соединительные провода не должны пересекать силовых линий. Они должны соединять начала или концы стержней на торцах цилиндра якоря.

Поскольку было установлено, что проводники надлежит соединять только конец с концом или начало с началом, будет не трудно найти правильное решение. Есть только один путь. Должны соединяться

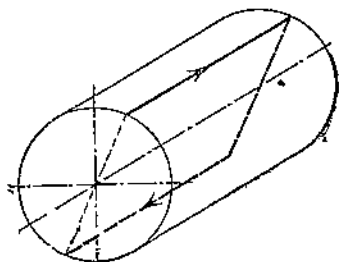


Рис. 48

последовательно только такие проводники, у которых напряжения почти или полностью противоположно направлены. Рис. 48 показывает составление обмотки двухполюсного якоря, а рис. 49 — четырехполюсного якоря.

Чертеж обмотки якоря рекомендуется давать на развернутой поверхности якоря. Рис. 50 ясно говорит за это. Этот чертеж сразу показывает, что мы снова возвращаемся к виткам, как в трансформаторной обмотке, с той лишь разницей, что на якоре витки геометрически сдвинуты друг относительно друга.

Векторная диаграмма дает нам весьма изящный способ проследить образование напряжения обмотки. Напряжения отдельных витков, состоящих из двух напряжений на стержне, как синусоидальные, могут быть представлены в виде векторов. Геометрическому углу между соседними витками соответствует фазный угол между соседними витковыми напряжениями. Так получается последовательность векторов, показанная на рис. 51, в результате сложения дающих вектор напряжения обмотки E_2 . Правильный многоугольник витковых напряжений может быть заменен окружностью, когда имеется большое количество витков, или стержней, т.е. когда обмотка якоря распределена весьма плавно. Тогда напряжение обмотки изобразится в виде хорды дуги этой окружности (рис. 52). Дуге окружности якоря, соответствующей требующемуся для обмотки углу β (рис. 50), в двухполюсной машине на векторной диаграмме как раз соответствует тоже угол β (рис. 52): У многополюсных машин электрический угол снова в $\frac{p}{2}$ раз больше.

Геометрическое сложение витковых напряжений означает в известной степени потерю напряжения. Дуга всегда длиннее своей хорды.

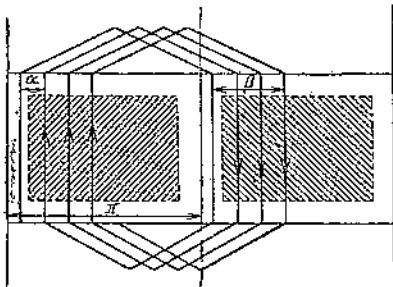


Рис. 50

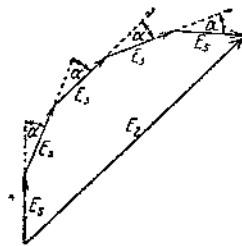


Рис. 51

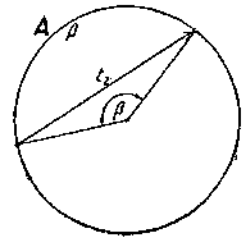


Рис. 52

Арифметическая сумма витковых напряжений дает действительные напряжения обмотки лишь после умножения ее на

$$f_w = \frac{\text{длина хорды}}{\text{длина дуги}}$$

Рис. 52 дает возможность тотчас же вычислить коэффициент обмотки f_w . Последний равен

$$f_w = \frac{\sin \frac{\beta}{2}}{\frac{\beta}{2}} \dots \dots \dots (12)$$

Пользуясь уравнением (12), возможно произвести ряд практических подсчетов, но оно все же является только приближенным равенством. Известно, что при малых углах синус весьма мало отличается от самого угла. При $\beta = 60^\circ$ имеем

$$f_w = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{\frac{\pi}{6}} = \frac{0.5}{0.523} = 0.957.$$

При $\beta = 90^\circ$:

$$f_w = \frac{\sin \frac{\pi}{4}}{\frac{\pi}{4}} = 0.9.$$

Мы получаем более хорошее использование наводимых стержневых напряжений, если обмотка не слишком далеко расходится по якору.

Но все-таки, в конце концов, мы должны использовать всю окружность якоря; в виду этого мы должны считаться с увеличением центрального угла обмотки до 180° , так как в противном случае часть якоря пропадала бы для нас. Но для $\beta = 180^\circ$ получим

$$f_w = \frac{\sin \frac{\pi}{2}}{\frac{\pi}{2}} = \frac{1.0}{1.57} = 0.636;$$

коэффициент обмотки получился совсем скверным. На самом деле на практике никогда не используют для однофазной обмотки сплошь всю окружность якоря. При известном центральном угле обмотки наступает экономический предел, при котором уже не имеет смысла закладывать более длинные концы меди. Этот вопрос настолько существен, что стоит произвести небольшой подсчет.

Обозначим через K_o стоимость всей машины, за исключением стоимости обмотки якоря; стоимость обмотки якоря, использующей все фазы, а следовательно и всю его окружность, обозначим буквой K_a . Общая стоимость целиком обмотанной машины будет равна

$$K_o + K_a.$$

Эта стоимость уменьшится до величины

$$K_o + \beta \cdot K_a,$$

если обмотка будет намотана только на протяжении угла β . Мощность машины зависит от напряжения обмотки якоря и от допускаемого максимального тока, не изменяющегося от увеличения или уменьшения угла обмотки β . Мощность машины, обмотанной на протяжении угла β , относится к мощности целиком обмотанной машины, каковую мы примем за единицу, следующим образом

$$\frac{2 \sin \frac{\beta}{2}}{\pi}.$$

Будем считаться, конечно, с тем углом обмотки β , который дает наиболее дешевую конструкцию. Но решающим является, отнюдь, не минимальное значение выражения

$$\frac{K_o + \frac{\beta}{\pi} \cdot K_a}{\sin \frac{\beta}{2}}.$$

Задача несколько сложнее.

Мы всегда имеем дело с заданной мощностью. Если угол β взять меньше π , то первоначально заданная нами мощность уже не будет достаточна, и все размеры машины должны быть увеличены.

Если мы увеличим в X раз все размеры машины, сохраняя величину электрической нагрузки в железе и меди и число оборотов, то мощность увеличится пропорционально четвертой степени X , а веса и стоимости — пропорционально X^3 . Стоимость единицы мощности падает. Удельная стоимость останется той же, если ее относить к мощности, возведенной в степень $3/4$.

В конечном счете нужно искать минимальное значение выражения

$$\frac{K_o + \frac{\beta}{\pi} \cdot K_a}{\sin \frac{3/4 \beta}{2}},$$

если стремиться к определению наиболее выгодного угла обмотки β . Таким путем получим равенство

$$\frac{4}{3} \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \frac{\beta}{2} + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{K_o}{K_a},$$

из которого можно вывести заключение, что угол

$$\beta = 120^\circ$$

еще оправдывается, так как стоимость обмотки, заполняющей все пазы якоря, никогда не достигает половины суммарной стоимости машины.

Однофазная обмотка якоря охотно исполняется с $\beta = 120^\circ$. Минимум стоимости выражен не очень резко, поэтому некоторые значительные отклонения от оптимального угла все же приходится учитывать. Зато при $\beta = 120^\circ$ мы получаем обмотку, вызывающую синусоидально расположенный по окружности якоря магнитный поток якорной обмотки.

Обтекаемый ток якоря имеет, конечно, собственный магнитный поток. Обмотка якоря выглядит так же, как обмотка возбуждения с распределенным геометрически возбуждением, подобно описанному в 19 главе. Для создания на обмотке напряжения совершенно безразлично, намотана ли обмотка по схеме рис. 42 или же рис. 43. Мы уже убедились в том, что для достижения синусоидального потока при распределенной обмотке возбуждения лучше всего наматывать ее на протяжении $2/3$ окружности.

Разумеется, для формы кривой магнитного потока обмотки также совершенно безразлично, выполнена ли обмотка по рис. 42 или по рис. 43. Основным является правильный угол обмотки. Практически не является безразличным также выполнение лобовых соединений на торцах якоря стержня со стержнем. Указанный на рис. 43 тип обмотки позволяет выполнить более целесообразно лобовые соединения и удобней для изолирования последних. Обмотка якоря для сколько-нибудь повышенного напряжения должна быть выполнена согласно рис. 43.

22. ТРЕХФАЗНЫЕ ОБМОТКИ.

Однофазные машины почти никогда не строятся и не применяются. Исключением являются коллекторные машины, которые будут описаны позднее. Однофазный ток был вытеснен отовсюду током трехфазным. Для электрических железных дорог и весьма малых приводов меньше одвой лошадиной силы применяют еще однофазный ток. Таким образом, мы

освобождаемся от обмотки якоря, не позволяющей нам использовать полностью всю окружность якоря.

Трехфазный переменный ток на много сложнее однофазного уже при решении вопросов распределения мощности в низковольтных сетях. Но еще более сложным он является в электромашиностроении. Трехфазный ток вытеснил все остальные виды переменного тока, так как несимметричность двухфазного тока является неприемлемой; увеличивать же число фаз больше трех также нерационально, так как при этом получаются слишком сложные и хлопотливые установки. Трехфазный ток, как известно, состоит из трех однофазных переменных токов одинаковой силы, периодичности и сдвига фаз, равного 120° между отдельными фазными токами. Конечно, при этом мы получаем и 3 одинаковых фазных напряжения с одинаковым числом периодов и сдвигом фаз между собой в 120° .

Весьма знаменательно, что никогда не говорят еще об одной общей величине для всех трех фаз, а именно — о равенстве числа периодов, что по существу является самым важным. Это настолько существенно, что равенство числа периодов считается само собой понятным. Но это само собой разумеющееся требование является для теории машин весьма ценным фактом. Рассмотрим его тут же.

Число периодов, как мы это видели в электрической машине, задается чисто механическими причинами. Периодичность в конечном счете зависит от числа оборотов якоря. Нельзя даже надеяться на то, чтобы 3 машины в самом деле имели настолько идентичные условия привода, чтобы их периодичность не разнилась друг от друга, т.е. чтобы колебания были строго одновременны и одинаковы по величине. Для этого есть только один надежный способ, а именно, чтобы все фазы якоря находились на общем валу.

От этого заключения до настоящего практического решения всего один шаг. При этом существенную помощь нам окажут данные предыдущей главы. Итак, лучше всего получать все три фазных напряжения и их три фазных тока при помощи одного общего якоря.

Напряжения отдельных якорных стержней сдвинуты по фазе друг относительно друга. Два стержня, по окружности якоря сдвинутые на 120° электрических градусов, или при двухполюсной машине на 120° геометрических градусов, при 4-х полюсной — на 60° , дают напряжения, сдвинутые на желательные 120° . Все обмотки, выполненные согласно изложенных в предыдущей главе правил, со сдвинутыми на 120° осями, создают два фазных напряжения, фазы которых сдвинуты также на 120° . Трехфазная обмотка якоря поэтому должна состоять из трехфазных обмоток, оси которых составляют между собой угол в 120° .

Не трудно сделать следующие логические выводы. Все три фазных обмотки равнозначны. Каждый из них соответствует одна треть окружности якоря, под каждым полюсом находится одна треть полюсного деления. Угол каждой фазной обмотки получается следовательно равным

$$\beta = \frac{\pi}{3} = 60^\circ.$$

На первый взгляд может показаться, что при подобном расположении между осями обмоток вы получаете угол в 60° .

Рис. 53 показывает, что возможно поместить начала первой и третьей фаз обмотки под одним полюсом и начало второй фазы под другим полюсом. При таком размещении мы сразу получим требующийся нам угол 120° между осями фазных обмоток.

Трехфазная обмотка якоря на самом деле выполняется, согласно высказанной идее. На рис. 53 даны подробности. Из него сейчас же можно заключить, что лобовые соединения отдельных фаз перекрываются и стоят друг у друга на дороге. Как показано на рис. 53, их располагают в трех плоскостях.

Но можно при исполнении лобовых соединений обойтись только двумя плоскостями, что показано на рис. 54. При четырех полюсных якорях иногда бывает желательно иметь разделяющую плоскость, через которую лобовые соединения не должны проходить совсем. Если якорь выполняется состоящим из двух частей и требуется отправить каждую часть в обмотанном виде, во избежание обмоточной работы на месте, то расположение обмоток по рис. 55 является весьма ценным.

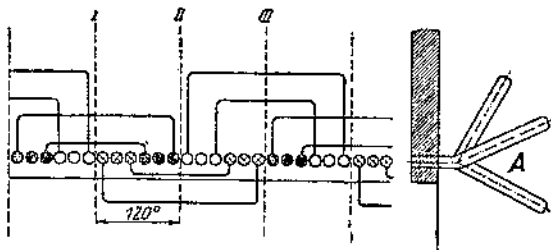


Рис. 53

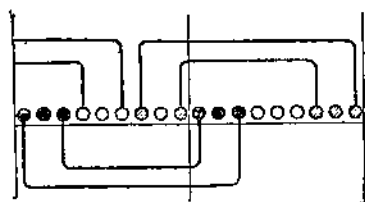


Рис. 54

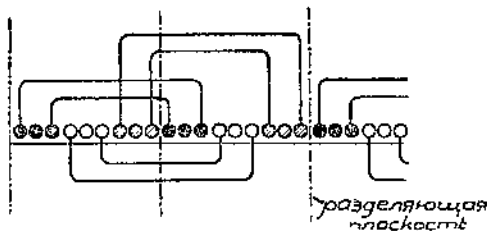


Рис. 55

Стоит, наконец, отметить, что иногда делаются искривленные лобовые соединения, которые переходят из одной плоскости обмоток в другую (рис. 56). Легко обнаружить, что это существенное затруднение получается при кратном трех числе пар полюсов.

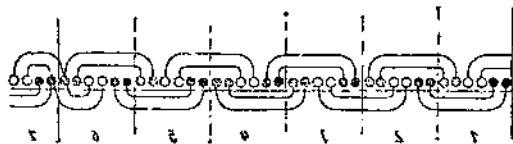


Рис. 56

Трехфазная обмотка с углом обмотки $\beta = 60^\circ$ безупречна во всех отношениях. Она дает весьма благоприятный обмоточный коэффициент, как было уже показано в исследованиях предыдущей главы. Полноты ради, упомянем уже сейчас, что трехфазные обмотки могут быть выполнены и выполняются также только с углом обмотки $\beta = 120^\circ$. Но к этой подробности мы еще вернемся.

23. ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ. ВРАЩАЮЩИЙСЯ МАГНИТНЫЙ ПОТОК.

Всякая нормальная эксплуатация предъявляет к трехфазному генератору безусловное требование, заключающееся в однообразии числа периодов. Зато, при удовлетворении этого требования, при установке всех остальных машин, питающихся от общей электрической сети мы освобождаемся от всяких забот о числе периодов.

Трансформация, почти неизбежная в установках трехфазного тока, тоже, конечно, должна быть трехфазная. Она может быть выполнена при

помощи однофазных трансформаторов, каждый из которых будет представлять отдельную фазу.

Трехфазный генератор должен быть выполнен обязательно в виде одной единицы; трехфазный трансформатор свободен от этого обязательного условия. Выполнение трехфазного трансформатора также в одной единице — дело нашего свободного выбора.

В Америке почти всегда каждая фаза трансформируется отдельно, как показано на рис. 57.

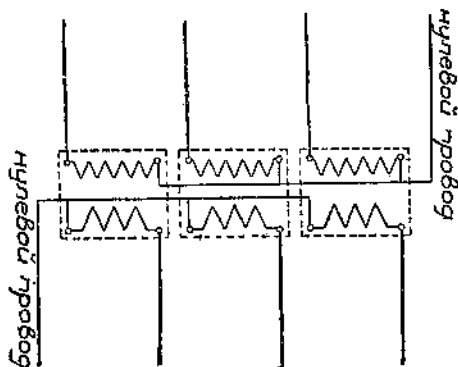


Рис. 57

Эта точка зрения подтверждается данными американской практики. Последняя говорит за то, что надежность эксплуатации требует резерва в трансформаторах, который необходимо преду-

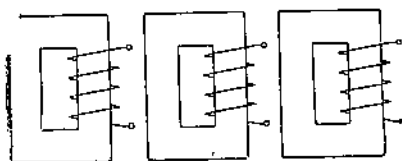


Рис. 58

смотреть на каждой трансформаторной подстанции, чтобы не прекратить подачи тока в случае повреждения в работающей при высоком напряжении трансформаторной группе; для трех находящихся в работе однофазных трансформаторов один четвертый однофазный трансформатор представляет вполне достаточный резерв.

В Европе тоже, конечно, сознают важность резерва в трансформаторных подстанциях. Больше того; мы устанавливаем к работающему трехфазному трансформатору в качестве резерва равный ему по мощности не работающий трехфазный трансформатор.

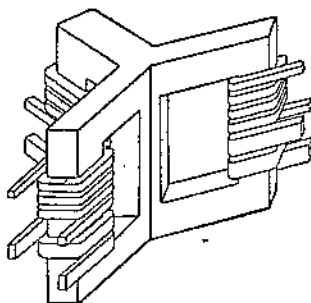


Рис. 59

Американцы утверждают, что резерв в виде четырех однофазных трансформаторов меньше на $\frac{1}{3}$, чем резерв в виде двух трехфазных трансформаторов на полную мощность каждый; в то же время европейцы уверяют, что их резерв более полный. Здесь мы имеем принципиальное разногласие. Трехфазный трансформатор безусловно получился из трех однофазных трансформаторов, у которых обмотан только один kern, как показано на рис. 58. Вполне естественно было объединить три необмотанных керна вместе и получить устройство, изображенное на рис. 59. Скорее, однако, обнаружили, что общий kern трех однофазных трансформаторов является совершенно излишним. Его назначением является быть проводником суммы трехфазных магнитных потоков. Но если все три фазных напряжения равны по величине и фазы их сдвинуты между собой на 120° , то и магнитные потоки трех идентичных трансформатора должны быть между собой равны и тоже сдвинуты на 120° ; сумма же их должна быть равна нулю. Так получилось устройство рис. 60, который ясно показывает, что трехфазный трансформатор должен быть дешевле, чем три однофазных, из которых он произошел. Отсюда уже недалеко к обычно применяемому в настоящее время исполнению, согласно рис. 61.

Нет нужды развивать здесь теорию трехфазного трансформатора. То, что происходит в одной фазе, происходит и в остальных двух. Теория однофазного трансформатора есть в то же время теория каждой фазы трехфазного трансформатора. Если в отношении трехфазного трансформатора вопрос о том, должен ли он состоять из одной единицы или из трансформаторной группы из 3 трансформаторов, мы можем оставить открытым, то уже в отношении трехфазных моторов обстоятельства складываются совсем иначе, хотя в последних и не требуется соблюдения однообразия числа периодов. Подобно трехфазным генераторам, мы их себе всегда мыслим сосредоточенными в одной единице.

Для этого есть всякие основания. Мотор представляет собой обращенный генератор. Мы уже видели, что генератор с тремя обмотками гораздо совершенней однофазного. Он дает возможность хорошо использовать всю свободную поверхность якоря, что нельзя сделать при однофазном генераторе. Хотя бы уже по этой причине однофазная машина должна отойти на задний план.

К этому присоединяется еще другое, весьма важное обстоятельство, что не только образование напряжений при трехфазном исполнении гораздо совершенней, чем при однофазном исполнении, но и условия намагничивания трехфазного якоря гораздо благоприятней, чем у однофазного якоря.

Наконец, явление вращающегося потока, которое в свое время перенесло электромашиностроение на совершенно новую почву, содействовало окончательной победе переменного тока над постоянным и открыло многофазному току путь к небывалым успехам.

При изучении теории трансформатора переменного тока мы быстро перешли к рассмотрению магнитных явлений во вторичной обмотке. К изучению магнитных явлений в обмотке якоря — вторичной обмотке механизированного трансформатора — мы приступаем только сейчас. Зато мы открыли много новых возможностей, которые делают необычайно живым наше представление о принципе действия вращающихся электрических машин.

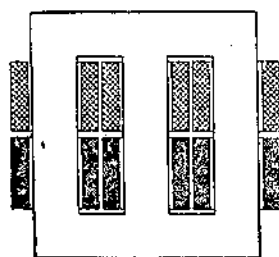


Рис. 61

При изучении теории трансформатора переменного тока мы быстро перешли к рассмотрению магнитных явлений во вторичной обмотке. К изучению магнитных явлений в обмотке якоря — вторичной обмотке механизированного трансформатора — мы приступаем только сейчас. Зато мы открыли много новых возможностей, которые делают необычайно живым наше представление о принципе действия вращающихся электрических машин.

24. ВОЗБУЖДЕНИЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА.

Фазовая обмотка трехфазного якоря выполняется точно так же, как распределенная обмотка возбуждения, описанная в 19 главе (рис. 62). Когда по фазной обмотке протекает ток, то он возбуждает трапециевидный магнитный поток; при этом мы предполагаем, конечно, что магнитное сопротивление железного корпуса машины одинаково в любом месте по окружности якоря.

Основываясь на этом предположении, мы должны изобразить кривую распределения фазного магнитного потока обмотки якоря в виде трапеции (рис. 63). При этом мы пренебрегаем всегда имеющими место ступенями в кривой, как это изображено на рис. 63 пунктирной линией. Наше допущение справедливо при достаточном числе пазов якоря на полюс и фаза

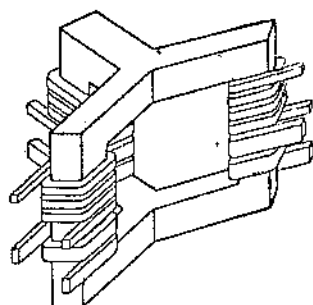


Рис. 60

Малый, сравнительно, угол обмотки $\beta = 60^\circ$, применяемый при трехфазных обмотках в значительной степени лишает трапециoidalный магнитный поток его весьма ценного сходства с синусоидой. Несмотря на это, будем считать магнитный поток синусоидальным до тех пор, пока мы дадим основные положения вращающегося потока; после этого мы снова вернемся к трапециoidalному магнитному потоку и снова рассмотрим более точно это явление.

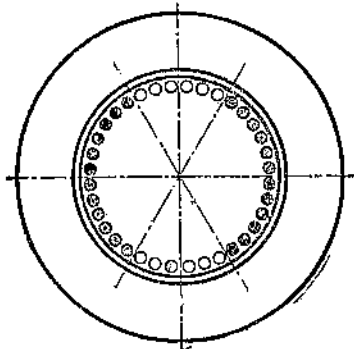


Рис. 62

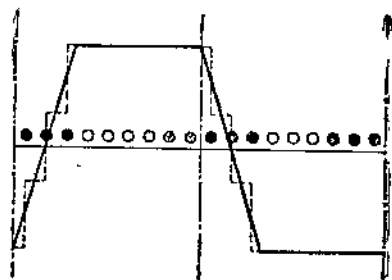


Рис. 63

Фазовый магнитный поток якоря возбуждается током нагрузки; последний является током переменным. Величина фазового магнитного потока поэтому изменяется во времени. Он будет изменяться по закону синуса, если величина магнитного сопротивления при любом возбуждении

будет постоянна. Сделаем и это последнее допущение, хотя свойства железа не позволяют это сделать; в этом отношении будем рассчитывать на преобладающее влияние воздушного зазора. В противном случае нам нужно было бы обязательно принимать во внимание магнитодвижущую силу, а не магнитные потоки или плотности силовых линий магнитного потока. Фазовый магнитный поток, кривая которого нами идеализирована, изменяется во времени и по месту по чистой синусоиде. На рис. 64 якорь разрезан по его оси плоскостью, перпендикулярной оси обмотки; от этой плоскости будем откладывать угол α , при помощи которого и будем определять любые точки на окружности якоря. Пусть максимальная плотность силовых линий достигает величины B_0 гауссов; тогда во время прохождения максимального намагничивающего тока в точке, находящейся под углом α , плотность силовых линий достигнет величины

$$B_0 \sin \alpha \text{ гауссов;}$$

а в любой момент времени t

$$B_0 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \omega t \text{ гауссов.}$$

В тот же момент, в том же самом месте магнитный поток второй фазы якоря будет иметь плотность

$$B_0 \sin (\alpha - 120) \sin (\omega t - 120) \text{ гауссов,}$$

так как фазные обмотки сдвинуты друг относительно друга геометрически на 120 электрических градусов и обтекаются одинаковыми по силе, но сдвинутыми по фазе на 120° токами.

Третья обмотка, конечно, также возбуждает собственный магнитный поток. Его плотность в месте α , во время t , будет

$$B_0 \sin(\alpha - 240) \sin(\omega t - 240) \text{ гауссов.}$$

Все три фазных магнитных потока образуются одновременно, их плотности складываются; вся трехфазная обмотка наводит суммарный магнитный поток, плотность которого на угле α , во время t окажется равной

$$B = B_0 [\sin \alpha \cdot \sin \omega t + \sin(\alpha - 120) \sin(\omega t - 120) + \sin(\alpha - 240) \sin(\omega t - 240)] \text{ гауссов.}$$

Как легко убедиться

$$B = \frac{3}{2} B_0 \cos(\alpha - \omega t) \text{ гауссов.} \quad (13)$$

Наведенный тремя фазами суммарный магнитный поток изменяется также синусоидально и синусоидально распределяется вдоль окружности якоря.

Но верное представление о суммарном магнитном потоке мы получим лишь тогда, когда рассмотрим его плотность в произвольной передвигающейся с угловой скоростью ω по окружности якоря точке

$$\alpha = \alpha_0 + \omega t.$$

Искомая плотность получится равной

$$B_a = \frac{3}{2} B_0 \cos \alpha_0 \text{ гауссов,}$$

т.-е. остается постоянной.

Таким образом, суммарный магнитный поток нагруженного трехфазного якоря представляет собой постоянный магнитный поток, синусоидально расположенный в пространстве и вращающийся вокруг оси якоря с угловой скоростью

$$\omega = 2\pi f,$$

зависящей от числа периодов f якорного тока; его можно назвать поэтому вращающимся магнитным потоком.

Понимание этого нового явления рекомендуется углубить одним важным опытом. Для этого мы коренным образом преобразим полученную нами модель электрической машины, ничего, однако, при этом по существу не меняя, а именно: превращаем якорь в неподвижную часть машины, а магнитный остов заставляем вращаться. Если на рис. 65 магнитное колесо будет вращаться с такой же скоростью относительно стержней якоря, с какой ранее вращались последние относительно корпуса магнитов, то на самом деле не произойдет никакого изменения. Полученная нами машина с внутренними полюсами работает по тому же принципу, как и прежняя машина с наружными полюсами.

Теперь мы видим, что образованный магнитным колесом магнитный поток является вращающимся потоком. Он возбуждается постоянным током,

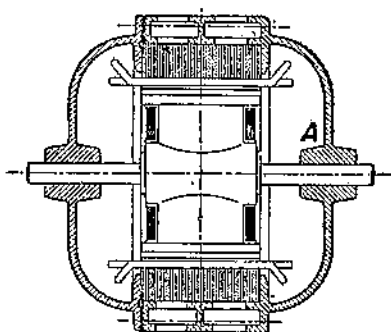


Рис. 65

а потому он сам постоянен; согласно наших предположений, вдоль окружности якоря он распределяется синусоидально и вращается вокруг оси машины.

Основной магнитный поток машины приводится во вращение механическим путем; он является вращающимся и наводится постоянным током. Вращающийся же магнитный поток якоря возбуждается трехфазным током и перемещается относительно обмотки якоря; таким образом, он движется и при неподвижной обмотке якоря. То обстоятельство, что вращающиеся потоки должны приводиться в движение механическим путем, если они наводятся постоянным током, и, что вращающиеся потоки могут наводиться также неподвижными трехфазными обмотками, является исключительно важным для теории электрических машин. Представляется определенно неудобным, что для работы машины трехфазного тока приходится получить сначала постоянный ток, необходимый для создания вращающегося магнитного потока при помощи первичной обмотки. Совершенно очевидно, что гораздо удобнее иметь возбуждение трехфазным током.

Итак, мы имеем в машине трехфазного тока два вращающихся магнитных потока. Вращающееся магнитное колесо создает главный вращающийся магнитный поток, который возбуждается при помощи постоянного тока. Неподвижная обмотка якоря возбуждает вращающийся поток якоря. Оба потока вращаются с одинаковой угловой скоростью; следовательно они занимают друг относительно друга неизменное положение. Угловая скорость магнитного колеса определяет периодичность обмотки якоря, а эта последняя задает угловую скорость вращающегося потока якоря.

25. УТОЧНЕНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ВРАЩАЮЩЕМСЯ МАГНИТНОМ ПОТОКЕ. ДВУХФАЗНЫЙ ТОК.

Мы значительно лучше проследим возникновение вращающегося потока обмотки якоря, если на время откинем соображения предыдущей главы. Развернем окружность якоря и начертим для некоторого момента три фазовых магнитных потока соответственно их действительному взаимному расположению, а потом образуем из них суммарный поток; при этом простоты ради, будем предполагать потоки синусоидальными.

Эта картина должна быть повторена для многих, следующих друг за другом через равные промежутки времени моментов. Чередование этих изображений дает, как в кино, живую картину суммарного магнитного потока, который и является вращающимся.

Мы начали с того момента, когда ток в фазе I достигает своего максимального значения. В двух прочих фазах ток имеет половину их отрицательного максимального значения. Легко обнаружить, что максимальная плотность силовых линий суммарного магнитного потока имеет место на оси обмотки фазы I.

Через $1/12$ части периода ток фазы I будет равен $\frac{\sqrt{3}}{2}$ своего амплитудного значения, ток фазы III имеет такую же величину, но отрицательную; во II фазе ток спал до нуля.

По истечении $1/6$ части периода ток в фазе III приобретает отрицательное максимальное значение. Два других фазовых тока равны половине своего амплитудного значения. Максимальная плотность тока суммарного потока передвигается к оси трехфазовой обмотки (рис. 66). Рассматривая последовательно каждую $1/6$ часть периода, мы получаем изображения, на которых суммарный магнитный поток движется вперед все время

на $\frac{1}{6}$ двойного полюсного деления. Он, следовательно, движется. А на самом деле он вращается. Как вращающийся поток, он сохраняет при своем передвижении свою форму.

Теперь мы можем быть более точны и отбросить принятую нами синусоидальную форму кривой, заменив ее действительной трапециoidalной. Мы снова набрасываем картины последовательных моментов, но делаем это более часто, через каждую $\frac{1}{12}$ часть периода.

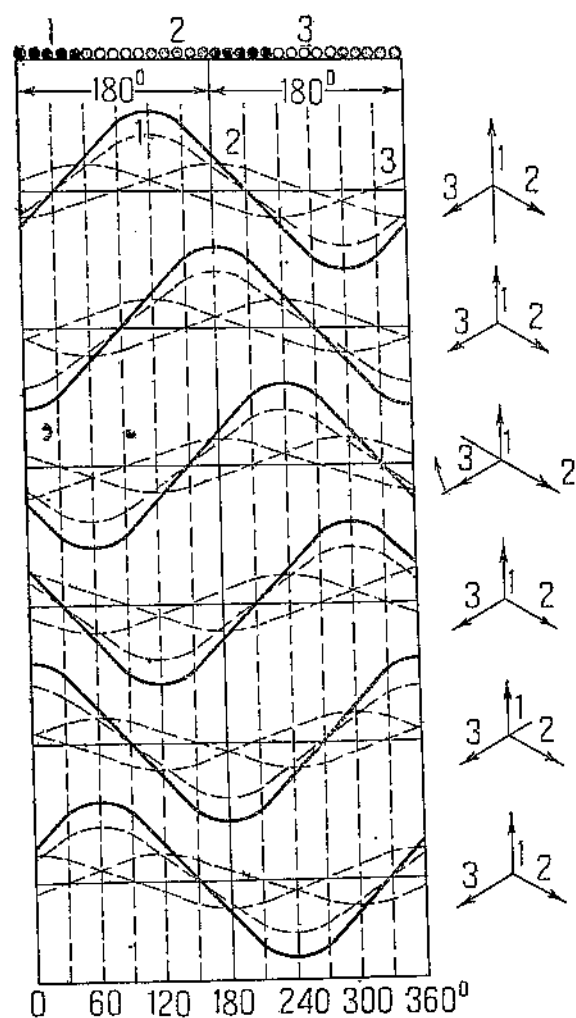


Рис. 66

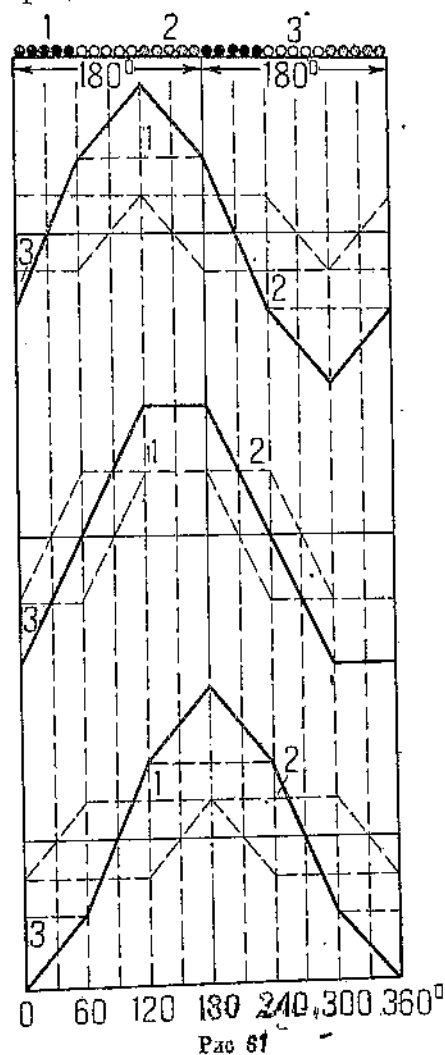


Рис. 67

Из рис. 67 мы делаем весьма важный вывод, что получающийся вращающийся поток передвигается равномерно, но изменяет при этом свою форму. Через каждую $\frac{1}{12}$ часть периода чередуются повторяющиеся формы кривой — острая и плоская.

Обе этих кривых, наложенные друг на друга, весьма близко подходят к правильной синусоиде. В виду этого всякая забота о форме кривой вращающегося потока становится излишней, несмотря на то, что угол обмотки равен, только 60° .

Но для подсчетов важно выразить максимальную плотность силовых линий вращающегося синусоидального потока (рис. 68) через максимальную плотность силовых линий трапециoidalного фазного потока. Из рис. 67 мы легко усматриваем, что магнитный поток остроугольной формы достигает двойной максимальной плотности фазного потока, а магнитный поток плоской формы доходит только до $\sqrt{3}$ этой величины. Между этими двумя значениями должна находиться величина максимальной плотности синусоидального эквивалентного потока. Если среднее значение числа силовых линий эквивалентного вращающегося потока примем равным среднему значению обоих действительных потоков, то величина максимальной плотности синусоидального потока будет, как показывает небольшой подсчет, в 1,826 раз больше максимальной плотности фазового потока.

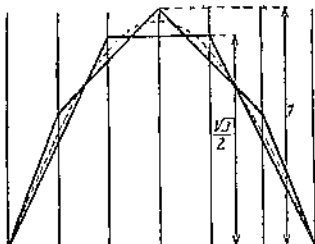


Рис. 68

Противоречие этого заключения с уравнением (13) только кажущееся. Трапециoidalные фазные потоки, в случае их замены синусоидальными, приобрели бы, конечно, большую максимальную плотность силовых линий; как показывает расчет, последняя возрастает до $\frac{2}{3}$ ранее определенной максимальной плотности синусоидального эквивалентного потока.

Вращающийся поток, в том виде, как мы его сейчас изучили, не является преимуществом только трехфазного тока. Он с таким же успехом наводится n равными переменными токами одной и той же периодичности, сдвинутых между собой на $\frac{360}{n}$ градусов каждый, если только эти токи проходят через n фазовых обмоток, оси которых смещены между собой на $\frac{360}{n}$ электрических градусов.

Аналитическое доказательство идет таким же путем, как в предыдущей главе. Результат в общем виде гласит

$$B = \frac{n}{2} B_0 \cos(\alpha - \omega t) \text{ гауссов} \dots \dots \dots (13a)$$

Таким образом, коэффициент $\frac{n}{2}$ в уравнении (13) не является случайным. Можно получить вращающийся магнитный поток даже при помощи двух переменных токов, сдвинутых по фазе на 90 градусов, и протекающих через обмотки, оси которых сдвинуты на 90 электрических градусов. Пользуясь обозначениями предыдущей главы, мы получим величину плотности фазовых магнитных потоков

$$B_0 \sin \alpha \sin \omega t$$

и

$$B_0 \sin(\alpha - 90) \sin(\omega t - 90);$$

откуда плотность вращающегося магнитного потока

$$B = B_0 \cos(\alpha - \omega t) \text{ гауссов}.$$

Двухфазный магнитный поток также подпадает под действие уравнения (13a). Он представляет собой наиболее просто построенный вращающийся поток. Он в то же время был первым вращающимся потоком, с которым начали работать в электротехнике.

Насколько важно было появление вращающегося потока для практической электротехники можно ясней всего заключить из того факта, что, несмотря на все свои недостатки, введенный в многочисленных установках 90-х годов прошлого столетия двухфазный ток работает еще частично и по сие время. Его вращающийся поток был весьма ценен, а его недостатки по сравнению с его достоинствами были менее существенны, хотя и в достаточной мере неприятны.

Трехфазный ток тотчас же, конечно, вытеснил двухфазный. Он, обладая безупречным вращающимся потоком, не имеет недостатков двухфазного тока. В старых установках трехфазный ток придет на смену старым машинам, как только последние будут амортизированы; это всего лишь вопрос времени.

26. ОБЗОР ФОРМ ИСПОЛНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ.

Обзор механизированной трансформации сильно изобилует отдельными картинками: тип с наружными полюсами, с внутренними полюсами, трехфазное и однофазное исполнение, сосредоточенное и распределенное возбуждение и, наконец, вращающийся поток.

Все это только вариации одной и той же идеи, идеи механизированного трансформатора. Речь идет всегда о магнитном потоке, который возбуждается постоянным током и линии которого пересекаются стержнями. Основной идеей механизирования трансформации является переход от изменения магнитного потока, который должен пройти сквозь отверстие витка, к пересечению силовых линий стержнями, вращающимися относительно магнитного потока. Все эти вариации имеют большое практическое значение, которое не следует недооценивать. Представляется не лишним, здесь при резюмировании полученных результатов дать в нескольких словах короткое описание назначения той или иной вариации.

Прежде чем снабдить машину выступающими полюсами, нужно подумать о том, что при этом могут встретиться два затруднения. Прежде всего, обмотку якоря избегают помещать на вращающемся якоре при повышении наводимого машиной напряжения. Нельзя хорошо снимать высокое напряжение с контактных колец. С другой стороны, необходимо учесть действие центробежной силы и вращать лучше круглые тела с равномерно распределенной массой. Короче говоря, напряжение понуждает нас к применению машины с внутренними полюсами, а центробежная сила, наоборот, — к применению машин с наружными полюсами.

Для только зарождающегося электромашиностроения было трудно сделать выбор между типом машины с наружными и внутренними полюсами. Но скоро генератор переменного тока превратился в машину с внутренними полюсами. В небольших установках первого времени обходились непосредственно напряжением самого генератора. Потому последнее не должно было быть слишком низким. После пришли к мысли об экономии трансформации путем сооружения генератора непосредственно на высокое напряжение. Еще и по сие время, при очень высоких напряжениях электропередач, когда хотят питать непосредственно прилегающую к генератору территорию, ставят генератор на среднее напряжение.

Все это предопределило тип машины с внутренними полюсами. Решающим моментом было также и то обстоятельство, что машины-двигатели в первое время были все сравнительно тихоходные, так что, вследствие вошедшего вскоре в обиход непосредственного соединения, затруднений со стороны центробежной силы при сооружении генератора не было.

Дело приняло совсем другой оборот, когда появлением паровой турбины от 50-периодного генератора потребовалось максимально возможное число оборотов. Колоссальное удешевление генераторов, которое стало теперь возможным и при наличии непосредственного соединения, не могло пройти незамеченным. Возник особый тип машин, так называемых турбомашин — турбогенераторов и турбомоторов.

Это название звучит не особенно хорошо, но оно подчеркивает ту неожиданность, с которой было связано появление совершенно новой конструктивной задачи. Действительно, сначала все определялось напряжением, а потом, спустя продолжительное время после того, как была решена удовлетворительно проблема напряжения, на первый план выступила центробежная сила.

Последняя не была такой значительной величины, чтобы потребовалось исполнение с наружными полюсами. Нельзя было жертвовать преимуществами неподвижной обмотки высокого напряжения. Но центробежная сила оказалась все же настолько значительной, что понадобилось введение распределенного возбуждения и связанного с последним магнитного колеса без выступающих полюсов в виде цилиндрического барабана с пазами, на подобие вращающегося якоря.

Исследование 19 главы показало, что обматывать нужно только две трети общего количества пазов магнитного колеса в целях сохранения синусоидальной формы магнитного потока машины.

Воздушный зазор, который сам собой устанавливается одинаковым по всей длине окружности якоря, поскольку применено распределенное возбуждение, уже больше нам помочь не в состоянии. Для того, чтобы действию центробежной силы подвергать целиком обмотанный якорь, в пазы, где не должно быть обмотки, закладывают холостые стержни.

Результат оказался удовлетворительным. Тип машины с внутренними полюсами остался в силе. Он сохранился и в том случае, когда потребовалось применение выступающих полюсов при очень больших окружных скоростях. Само собой понятно, что при этом проблема центробежной силы приобрела особую остроту.

Выступающие полюсы имеют преимущества, мимо которых пройти нельзя. Они дают возможность стягивать силовые линии магнитного потока в место нахождения обмотки возбуждения. В виду этого они позволяют экономить медь на обмотку возбуждения. Они, благодаря своей неправильной форме, сильнее воздействуют на воздух, в котором они вращаются, чем цилиндрические барабаны. Поэтому они способствуют лучшей вентиляции машины. Наконец, постоянство магнитного сопротивления вдоль всей окружности якоря является преимуществом скорей теоретическим, чем на самом деле влияющим на работу машины по существу. В некотором смысле представляется даже более выгодным, когда магнитный поток между двумя выступающими полюсами попадает в воздух.

Однако, с другой стороны, мы всегда должны помнить о том, что в машине имеет место не только магнитный поток, образуемый магнитным колесом, что, кроме того, всегда создается еще магнитный поток якоря. Если поэтому машина при холостом ходе дает чисто синусоидальное напряжение, то при нагрузке этого уже наблюдаться не будет. Хотя якорь обладает вращающейся суммарной синусоидальной магнитодвижущей силой, но вращающийся поток уже не может быть синусоидальным, так как магнитное сопротивление между полюсами очень велико. В отношении синусоидальности напряжения при любой нагрузке лучше всего приспособлена машина с неявными полюсами.

Заключительными напими соображениями относительно механизирования трансформации мы уже стали затрагивать исследование синхронных машин, которым посвящен следующий отдел. Мы будем иметь дело с возбуждаемым постоянным током и механически приводимым в движение магнитным потоком магнитного колеса. Но при этом мы должны помнить о том, что всякий вращающийся поток может быть получен при помощи трехфазного тока и неподвижной трехфазной обмотки. Эта возможность будет использована позднее в асинхронных машинах.

III. Синхронные машины.

27. КОНСТРУКЦИЯ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ.

Синхронная машина является полностью механизированным трансформатором. Об этом можно заключить сразу же по постоянному току, протекающему по первичной обмотке. Первичная обмотка предназначена только для возбуждения главного потока машины; в преобразовании энергии она большего участия не принимает.

Почти всегда мы имеем на общем валу с синхронной машиной, которая, как было указано выше, всегда выполняется в виде машины с внутренними полюсами, небольшой генератор постоянного тока, служащий источником постоянного тока для первичной обмотки. Эта вспомогательная машина является внешним признаком синхронной машины.

Свое название синхронная машина получила вследствие жесткой связанности вторичного числа периодов с числом оборотов магнитного колеса. Мы склонны рассматривать число периодов как величину постоянную, после того как мы добились однообразной периодичности во всех установках; синхронным мы называем всякое число оборотов, которое при любом числе полюсов удовлетворяет уже известному нам равенству

$$f = \frac{p \cdot n}{120}.$$

Синхронная машина, как это следует из данных предыдущей главы, вынуждена вращаться синхронно. Отсюда и происходит ее название.

Конструкция синхронной машины весьма проста. Снабженная часто выступающими полюсами, она имеет на своем валу массивное литое магнитное колесо, если только центробежная сила не заставляет прибегнуть к особым мерам. На суженной части полюсов помещается первичная обмотка возбуждения, которая не нуждается больше в контактных кольцах для приключения к источнику постоянного тока, так как питающая ее машина постоянного тока находится на общем валу с магнитным колесом. Соответствующей формой полюсных бандажей создается правильное распределение плотности силовых линий главного магнитного потока вдоль окружности якоря.

Неподвижный якорь, статор машины, изготавливается из железных листов, так как главный магнитный поток по отношению к железу статора является переменным. Обмотка статора (вторичная) вкладывается в пазы железного корпуса машины. Прочный остов обеспечивает механическую прочность статора и содержит в себе главные подшипники машины, чем сохраняется правильное положение магнитного колеса относительно статора.

При высоких числах оборотов строят, как уже было сказано, цилиндрические (барабанные) магнитные колеса; при этом выступающие полюсы исчезают, обмотка возбуждения закладывается в пазы магнитного колеса, а воздушный зазор становится постоянным вдоль всей окружности якоря.

Практика придает синхронным машинам на первый взгляд совершенно произвольно всевозможные внешние формы. Можно обнаружить типы с большим диаметром и весьма малой осевой длиной, и наряду с этим имеются удлиненные цилиндрические машины. Но в этом кажущемся беспорядке есть своя система. Наиболее дорогим материалом является медь. Конструкция не должна быть расточительна в отношении меди ради внешних форм. Необходимо получить формы, максимально способствующие экономии меди. Наиболее экономная форма есть в то же время наиболее правильная форма.

Каждая якорная обмотка нуждается в меди как для стержней, так и для соединительных проводов в лобовой части обмоток. Двухполюсная обмотка якоря с большим диаметром статора, при небольшой осевой длине, будет иметь чрезвычайно длинные соединительные провода и очень короткие стержни. В этом случае только небольшая часть меди якоря является активной.

Картина значительно изменится к лучшему, если мы выполним двухполюсный тип удлиненным, с небольшим диаметром. Соотношение между медью стержней и медью соединительных проводов изменится в благоприятную для машины сторону. Чем больше число полюсов, тем меньше оснований выбирать малый диаметр и большую осевую длину. Многополюсные машины по своей форме приближаются к диску, а машины с небольшим числом полюсов — к цилиндру. Каждое число полюсов имеет наиболее выгодное соотношение диаметра якоря к его длине. Сказанное проливает свет на многообразие внешних форм синхронной машины; таким же образом можно объяснить и варьирующиеся формы остальных электрических машин.

Обмотки якоря синхронных машин, большей частью трехфазные, строятся в соответствии с данными главы 21 и 22. Они могут быть, конечно, соединены в звезду или в треугольник. Следует решительно предпочесть соединение в звезду. Оно требует при заданном рабочем напряжении в $\sqrt{3}$ раз меньшее напряжение на обмотке, чем соединение в треугольник; следовательно, и число стержней при соединении звездой в $\sqrt{3}$ раз меньше. Вытекающее отсюда увеличение в $\sqrt{3}$ раз сечения стержней нельзя считать недостатком, уменьшающим значение уменьшения потребления для обмотки числа стержней. Кроме того, из чисто электрических соображений соединение звездой предпочтительней, в чем можно убедиться из нижеследующего исследования принципа действия синхронной машины.

28. ХОЛОСТОЙ ХОД СИНХРОННОЙ МАШИНЫ.

При холостом ходе синхронной машины следует подробно рассмотреть, главным образом, процесс образования вторичного напряжения. Главный магнитный поток магнитного колеса, представляющий собой вращающийся поток с неизменным числом силовых линий, соответствующим магнитодвижущей силе магнитного колеса и приводимый в движение механическим путем, пересекает стержни обмотки статора и наводит в них напряжение.

Но все происходит не так идеально красиво, как можно было предположить на основании расчетов 21 главы. Стержни распределены по окружности якоря не настолько равномерно, чтобы при их последова-

тельном соединении образовался многосторонний правильный векторный многоугольник, могущий быть замененным просто окружностью.

Мы не можем сделать слишком много пазов в железе якоря. В каждом пазу необходимо тщательно изолировать проводники по отношению к железу якоря; изоляционные же материалы дороги. Чем выше напряжение машины, тем с меньшим числом пазов она должна быть построена, во избежание чрезмерного ее удорожания. Однако, мы должны дать, по крайней мере, три пазов на полюс и фазу, так что трехфазная машина имеет в статоре пазов в 9 раз больше, чем полюсов. Если только представляется возможным, мы охотно берем четыре пазов на полюс и фазу.

Все проводники одного и того же пазов соединяются в катушку, которая, как самостоятельная часть обмотки якоря, изолируется отдельно. На торцах якоря мы объединяем все лобовые части катушек в одно общее фазовое лобовое соединение и таким способом достигаем известной экономии в изолирующих материалах. Напряжения стержней одной катушки сравнительно мало сдвинуты по фазе друг относительно друга; напряжения же катушек, наоборот, сдвинуты значительно. В виду этого фазовое напряжение состоит из 3, в лучшем случае из 4 катушечных напряжений; векторный многоугольник будет иметь только 3 или 4 стороны, и дуга круга уже не может его заменить со сколько-нибудь допустимой точностью.

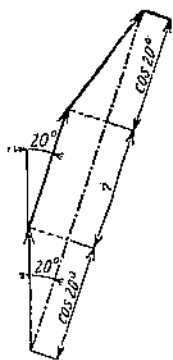


Рис. 69

Но если мы, предполагая существование синусоидального вращающего потока, определяем при трех пазов на полюс и фазу угол между напряжениями катушек одной и той же фазы в 20° , так как весь угол одной фазы обмотки по окружности якоря составляет 60 электрических градусов, то мы приходим к векторной диаграмме напряжения в катушках, данной на рис. 69; отсюда определяется коэффициент обмотки

$$f_w = \frac{1 + 2 \cdot \cos 20^\circ}{3} = 0,958,$$

что нас убеждает в том, что разница все же мала. Мы можем брать с достаточной точностью коэффициент идеально распределенной обмотки.

Пусть главный магнитный поток содержит Φ силовых линий, распределение которых по поверхности полюса определяется формулой

$$\frac{D \cdot \pi \cdot l}{p},$$

где D (см) внутренний диаметр якоря l (см) — длина якоря, а p — число полюсов. При синусоидальном распределении, как легко видеть, максимальная плотность силовых линий будет равна

$$\frac{\Phi p}{D \pi \cdot l} \cdot \frac{\pi}{2} \text{ гауссов.}$$

Максимальное значение наведенного на стержне напряжения будет равно

$$\frac{\Phi p}{2D \cdot l} \cdot v \cdot l \cdot 10^{-8} \text{ вольт,}$$

если магнитное колесо вращается со скоростью v секундсантиметров, что соответствует числу оборотов

$$n = \frac{60 \cdot v}{D \pi}.$$

Так как далее

$$f = \frac{p \cdot n}{120},$$

то максимальное значение напряжения в стержне упрощенно выразится следующим образом

$$\pi \Phi \cdot f \cdot 10^{-8} \text{ вольт;}$$

эффективное же значение будет равно

$$\frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot \Phi \cdot f \cdot 10^{-8} \text{ вольт.}$$

Наконец, если фаза содержит Z включенных последовательно стержней, то фазовое напряжение получится равным

$$E_2 = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot f_{\omega} \cdot \Phi \cdot f \cdot Z \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \dots \dots \dots (14)$$

Насколько синхронную машину в отношении образования напряжения можно уподобить трансформатору, показывает следующее рассуждение. Обмотка якоря с Z стержнями имеет очевидно $\frac{Z}{2}$ витков. Вообразив ее вторичной обмоткой трансформатора переменного тока, обладающего таким же по величине потоком, но изменяющимся с периодичностью f

$$\Phi_t = \Phi \sin(2\pi ft)$$

мы получим мгновенное значение наведенного напряжения

$$E_{2t} = -\frac{Z}{2} \cdot \frac{d\Phi_t}{dt} \cdot 10^{-8} = \pi \cdot f \cdot Z \cdot \Phi \cos(2\pi ft) \cdot 10^{-8}$$

эффективное значение которого, очевидно, равно

$$E_2 = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot \Phi \cdot f \cdot Z \cdot 10^{-8} \text{ вольт.}$$

Одного взгляда на уравнение (14) достаточно, чтобы сказать, что разница зависит от распределения витков на окружности якоря, что учитывается коэффициентом обмотки f_{ω} . Напряжение в стержне, которое мы считаем половинным напряжением витка, получается как у трансформатора, так и у синхронной машины равным

$$E_{st} = 2,22 \cdot \Phi \cdot f \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \dots \dots \dots (14a).$$

29. ФОРМА КРИВОЙ НАПРЯЖЕНИЯ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ.

Предположение, положенное в основу исследования предыдущей главы, что магнитный поток распределяется синусоидально вдоль окружности якоря, не всегда оправдывается в действительности. В случае выступающих полюсов часто имеют место магнитные потоки, подобно изображенным на рис. 32. Они получаются, когда на всем протяжении между полюсным башмаком и якорем воздушный зазор сохраняется постоянным; при этом упрощается изготовление машины. В данном случае кривая магнитного потока должна была бы иметь изображенную на рис. 70 прямоугольную форму.

Но магнитный поток сам собой стирает резко выраженные углы и края, так как он всегда ищет наиболее легкого пути для себя; так, например, силовые линии выступают даже из боковых поверхностей полюсов и полюсных башмаков.

Этот кажущийся на первый взгляд весьма неблагоприятным магнитный поток не является уже таким злом, как это можно было бы подумать. Разъяснить этот факт представляется совершенно необходимым. Этим самым под проблему образования напряжений мы подведем прочное основание, пользование которым во всех случаях поможет нам разобраться в магнитных потоках с произвольной формой кривой.

Согласно рис. 71, возьмем только два паза на полюс и фазу, при чем отдельные катушки в пазах будем предполагать состоящими только из одного стержня. Если мы заставим полюс пройти одно полюсное деление и будем изображать мгновенное значение напряжения одной фазы при каждом положении полюса, то мы легко получим кривую напряжения.

Если ширина прямоугольного магнитного потока будет равна, как обычно, двум третям полюсного деления, то при принятом нами расположении рис. 71, полюс должен пройти $\frac{1}{32}$ полюсного деления, прежде

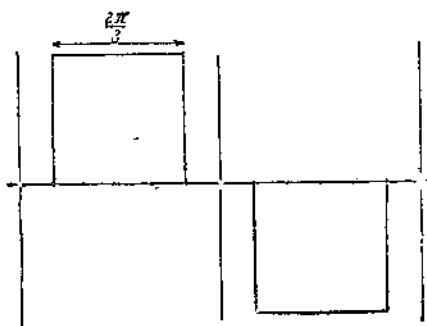


Рис. 70

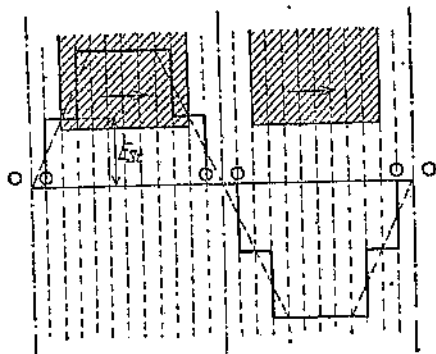


Рис. 71

чем он коснется своим правым краем первого стержня фазы. С этого момента фаза приобретет напряжение двух стержней, так как и соседний полюс в следующем полюсном делении начнет пересекать один стержень (рис. 71). После прохождения еще одной шестой полюсного деления к этому добавляется напряжение второго паза фазы.

Еще $2\frac{1}{2}$ шестых полюсного деления проходит полюс, ширина которого нами принимается равным 4 шестым, и на этом пути никакого изменения в фазном напряжении не происходит; так будет продолжаться, пока левый край полюса не покинет первого стержня фазы. Тогда напряжение снова падает, так как в первом стержне больше не будет наводиться напряжение. По прошествии еще одной шестой полюсного деления из-под полюса выходит и второй паз, после чего напряжение падает до нуля.

Даже при совершенно примитивном устройстве, где имеется прямо угольная форма кривой магнитного потока и только два паза на полюс и фазу, мы получаем трапециoidalную форму кривой напряжения (71); очевидно, что при увеличении числа пазов мы достигнем еще более благоприятных результатов. Точно также и резко выраженные углы в кривой напряжения пропадут, если таковых не будет в кривой магнитного потока.

Как известно, эффективное значение фазового напряжения будет равно корню квадратному из среднего значения квадратов всех мгновенных значений. Если напряжение стержня, или напряжение паза, обозначим E_{st} , то можно написать

$$E_2 = 2 \sqrt{\frac{2 \cdot E_{st}^2 + 3 \cdot (2E_{st})^2}{6}} = 3,054 E_{st}.$$

В свою очередь

$$\bar{E}_{st} = B \cdot v \cdot l \cdot 10^{-8}, \text{ где}$$

B постоянная плотность силовых линий магнитного потока, содержащего Φ силовых линий

$$B = \frac{3 \cdot \Phi \cdot p}{2 \cdot D \pi \cdot l} \text{ гауссов,}$$

если D (см) диаметр якоря, на котором имеется „ p “ полюсов. Итак

$$\bar{E}_{st} = 3 f \Phi \cdot 10^{-8}, \text{ а}$$

$$E_2 = 2,29 \cdot \Phi \cdot 4 \cdot 10^{-8}$$

соответственно четырем включенным последовательно стержням одной фазы:

$$Z = 4.$$

В общем виде фазовое напряжение для любой формы полюса и любого числа пазов может быть определено по формуле:

$$E_2 = k \cdot \Phi \cdot f \cdot Z \cdot 10^{-8}, \dots (14b)$$

в которой k называется коэффициентом Каппа. Производство подобных расчетов дает нам необходимое представление о различных устройствах и об образовании напряжений, которое, впрочем, как показывает уравнение (14b) не может выйти из пределов, предначертанных трансформатором переменного тока.

Междуфазовое напряжение при соединении звездой всегда представляет собой геометрическую разность между двумя фазовыми напряжениями. Если на рис. 72 мы наряду с напряжением первой фазы начертим подобную же кривую еще раз, но перевернем ее и сдвинем ее начало на две трети двойного полюсного расстояния, то сумма ординат обеих кривых составит кривую междуфазового напряжения, эффективное значение которого подсчитывается таким же способом, как и эффективное значение фазового напряжения.

Следует упомянуть, что при неправильной форме кривой фазового напряжения не всегда соблюдается соотношение $\sqrt{3}:1$ между междуфазовым и фазовым напряжением.

Из рис. 72 сразу видно, что форма кривой междуфазового

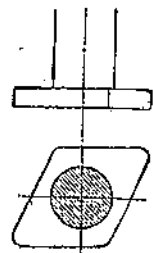


Рис. 73

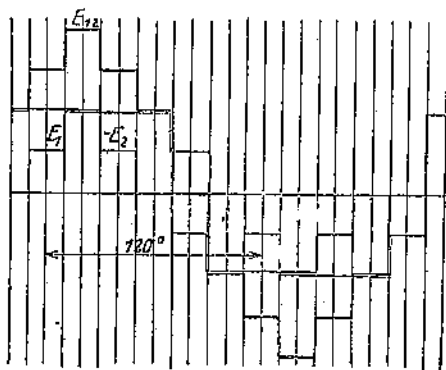


Рис. 72

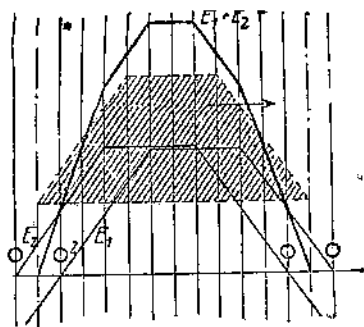


Рис. 74

напряжения сильно отличается от формы кривой фазового напряжения. Соотношение между напряжениями изменяют гармонические высшего порядка, так как соотношение $\sqrt{3}:1$ годно только для синусоидальных

напряжений. Трапецеидальный магнитный поток, который получается при постоянном магнитном зазоре и косо срезанных полюсных балках, согласно рис. 73, создает весьма благоприятную форму кривой напряжения. Рис. 74, изображенный для случая двух пазов на полюс и фазу, быстро нас в этом убеждает.

Современное электромашиностроение с большим успехом заменяет желательную нам синусоиду трапецеидальной линией, что не представляет для производства никаких затруднений, в то же время в достаточной степени упраздняет все искажения формы кривой напряжения.

Данный выше способ вычисления коэффициента Каппа подтверждает этот факт при помощи числа, показывающего соотношение между междуфазовым и фазовым напряжением. Итак, мы видим, что проблема образования напряжений в синхронной машине не наталкивается на чрезмерные трудности.

30. ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА ХОЛОСТОГО ХОДА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ.

Напряжение синхронной машины, как всякое напряжение якоря, пропорционально величине магнитного потока, пересекающего в данный момент стержни якоря. Но только при холостом ходе магнитный поток определяется исключительно магнитодвижущей силой обмотки магнитного колеса. Нагруженная машина, кроме того, имеет еще магнитный поток якоря. Действительный суммарный магнитный поток получается от ампервитков как магнитного колеса, так и якоря.

Вопрос о конструкции с неявно выраженными полюсами имеет большое значение для теории синхронной машины. Эта конструкция обеспечивает постоянство магнитного сопротивления на протяжении всего пути магнитного потока, независимо от положения оси последнего в данный момент; магнитодвижущая сила магнитного колеса и якоря в этом случае равнозначущи и образуют совместно, как у трансформатора переменного тока, результирующую намагничивающую силу.

Первичная магнитодвижущая сила магнитного колеса сама по себе образовала бы вращающийся поток. Она представляет собой постоянную магнитодвижущую силу, вызывающую магнитный поток с постоянным числом силовых линий; движение магнитного потока вызывается вращением магнитного колеса.

Вторичная магнитодвижущая сила якоря, также сама по себе в состоянии вызвать вращающийся поток. Она представляет собой трехфазную переменную магнитодвижущую силу и, согласно исследований глав 24 и 25, заменяет собой вращающуюся постоянную магнитодвижущую силу.

Прежде чем приступить к определению действительно активной суммарной магнитодвижущей силы и рассматривать одновременное действие первичной и вторичной магнитодвижущей силы, мы должны разрешить несколько предварительных вопросов. Мы знаем, что распределенная обмотка возбуждения машины с неявно выраженными полюсами образовала бы почти синусоидальный вращающийся магнитный поток, знаем, кроме того, что и вращающийся магнитный поток якоря также распределен бы почти синусоидально по окружности якоря. Нам известно, также, что число периодов якорного тока связано с числом оборотов магнитного колеса уравнением

$$f = \frac{p \cdot n}{120},$$

и что вращающийся поток якоря имеет электрическую угловую скорость

$$\omega = 2\pi f.$$

Из этого мы заключаем, что оба вращающиеся потока передвигаются с одинаковой скоростью, что их оси сохраняют между собой один и тот же угол, а, следовательно, обе магнитодвижущие силы могут складываться геометрически, как вектора. Но образованный осами угол пока нам не известен. Его то нам нужно определить в первую очередь.

Представим себе синхронную машину работающей как генератор, а вторичный ток совпадающим по фазе с наведенным вторичным напряжением. При этом мы пренебрегаем влиянием собственных сопротивлений обмотки якоря, так что наведенное напряжение якоря в то же время будет являться вторичным напряжением на клеммах.

Когда же напряжение якоря приобретает свое максимальное значение? В каждой фазе это будет иметь место, очевидно тогда, когда стержни фазовой обмотки будут пересекать наиболее густую часть вращающегося потока. Это как раз тот случай, когда ось вращающегося потока составляет угол в 90 электрических градусов с осью фазы обмотки.

Вращающийся магнитный поток машины, образуемый сообща якорем и магнитным колесом, является, конечно, решающим при наведении напряжения. Ось вращающегося потока якоря, как и всякого образованного трехфазной обмоткой вращающегося потока, совпадает с осью обмотки той фазы, ток которой в данный момент имеет максимальное значение. Это с очевидностью следует из рассуждений 25 главы. При безындукционной нагрузке синхронного генератора ось суммарного вращающегося потока и вращающегося потока якоря или, иными словами, вектор активной магнитодвижущей силы и вектор магнитодвижущей силы якоря образуют угол в 90 электрических градусов.

Векторная диаграмма рис. 75 полностью соответствует взаимному расположению во времени и в пространстве рабочих величин для любой нагрузки. Всякому вторичному напряжению E_2 соответствует вполне определенный заданный уравнением (14) суммарный вращающийся поток Φ , который в свою очередь требует известной суммарной магнитодвижущей силы. Магнитодвижущая сила якоря зависит от величины нагрузки, в виду чего магнитодвижущая сила магнитного колеса должна быть каждый раз соответственным образом установлена.

Если же магнитодвижущая сила магнитного колеса остается постоянной, то напряжение E_2 изменяется и устанавливается в зависимости от нагрузки. Машина в этом случае ведет себя совсем, как трансформатор тока, что описано в главе 18. В самом деле, даже векторная диаграмма синхронной машины, представленная на рис. 75, во всех отношениях подобна векторной диаграмме рис. 25.

Рассмотрим явление при какой-нибудь нагрузке машины при все время отстающем сдвиге фаз φ . Попрежнему мы должны ожидать в фазе максимальное значение напряжения тогда, когда ось суммарно вращающегося потока с осью фазовой обмотки образует угол в 90 электрических градусов. Ось суммарного вращающегося потока должна повернуться вперед на φ электрических градусов прежде, чем ток в рассматриваемой фазе достигнет своего максимального значения. Угол между осями суммарного вращающегося потока и вращающегося потока якоря изменяется сравнительно со случаем безындукционной нагрузки на φ градусов. Требуется выяснить, равен ли он $90 + \varphi$ или $90 - \varphi$ градусов?

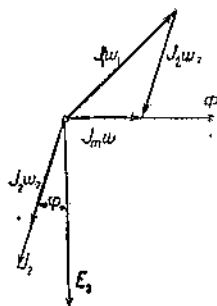


Рис. 75

Ответ на это получается быстрее всего, если мы возьмем крайний случай, когда

$$\varphi = 90^\circ,$$

т.е. случай чисто индуктивной нагрузки. Будем считать вращающийся магнитный поток положительным тогда, когда он входит в якорь и выходит из магнитного колеса. Наведенное напряжение будет направлено в плоскость чертежа (рис. 76) и получит максимальное значение, когда ось суммарного магнитного вращающегося потока займет начерченное положение, при вращении магнитного колеса по часовой стрелке. Очевидно, что через четверть периода ось суммарного магнитного потока совпадет как раз с осью обмотки, а реактивный ток нагрузки, имея максимальное свое значение, будет вступать в плоскость чертежа в верхние стержни обмотки. По правилу бурава ток возбуждения течет в том же направлении, в каком необходимо вращать правой рукой бурав, если направление силовых линий должно совпадать с направлением поступательного движения бурава. Сразу видно, что ось вращающегося магнитного потока якоря совпадает с осью суммарного вращающегося магнитного потока, и что последний магнитным потоком якоря ослабляется. Таким образом оси обоих потоков образуют угол в 180 электрических градусов.

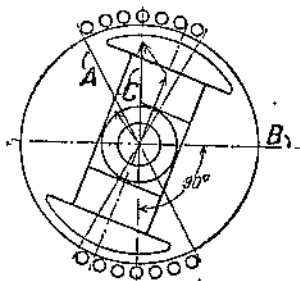


Рис. 76

Теперь становится совершенно ясным, что при сдвиге фаз φ между током и напряжением между осями суммарного вращающегося потока и потоком якоря имеет место угол $90 + \varphi$. Угол φ является положительным, если ток отстает. Отсюда мы легко получаем векторную диаграмму рис. 75 для заданного фазного угла φ .

Синхронная машина — настоящий трансформатор тока. К ней всегда приложена заданная магнитодвижущая сила магнитного колеса, а нагрузочные сопротивления вторичной цепи, к которым надлежит причислить также собственные сопротивления вторичной обмотки, определяют сдвиг фаз при нагрузке φ .

Но кроме характера образования напряжений в обмотке якоря, нас возвращает к трансформатору переменного тока еще соотношение магнитодвижущих сил. Разновидность трансформатора, играющая на практике подчиненную роль и применяющаяся, как измерительный трансформатор, для теории электрических машин имеет первостепенное значение, так как в ней содержится теоретическая сторона принципа действия трехфазной синхронной машины.

Строенные и простые векторные диаграммы трансформатора тока могут быть целиком применены к трехфазным синхронным машинам только в том случае, если последние будут снабжены неявно выраженными плюсами, т.е. когда магнитное сопротивление во всевозможных радиальных направлениях будут одинаковы. Но и для машин с выступающими полюсами векторная диаграмма трансформатора тока является неоценимым пособием при исследовании принципа действия синхронной машины. Если не придавать большого значения точности, то эту векторную диаграмму можно рассматривать, как универсальную.

31. ПОЛУЧЕНИЕ ПЕРВИЧНОЙ И ВТОРИЧНОЙ МАГНИТОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ.

В векторной диаграмме синхронной машины с выступающими полюсами играют главную роль вектор магнитодвижущей силы магнитного

колеса и вектор магнитодвижущей силы якоря. В предыдущей главе мы достаточно уяснили себе направление этих векторов, но мы еще не определили величину их.

Несомненно также и то, что относительно величины активной магнитодвижущей силы мы говорили слишком мало. Как всегда, магнитодвижущая сила представляет собой произведение силы тока и числа витков обмотки. Например, если первичный постоянный ток магнитного колеса равен I_1 ампер, а обмотка магнитного колеса содержит w_1 витков, то магнитодвижущая сила обмотки будет $I_1 w_1$ ампер.

Но в синхронной машине возникают две совершенно разных по своей структуре магнитодвижущих силы. На ряду с простой обмоткой постоянного тока магнитного колеса, мы имеем еще трехфазную обмотку переменного тока, содержащую w_2 витков в каждой фазе и обтекаемую током I_2 эффективных ампер. Очевидно, необходимо найти общий масштаб, при помощи которого можно будет производить подсчеты и правильно составить векторную диаграмму.

Мы можем сравнивать разные по своему характеру магнитодвижущие силы только по их действию. Мы будем приписывать им одинаковую силу в том случае, если они вызывают одинаковые вращающиеся потоки. Что касается магнитодвижущей силы магнитного колеса, то мы с успехом можем попрежнему изобразить ее простым произведением силы тока и числа витков. Но мы должны отыскать ту фазовую магнитодвижущую силу $I_a w_2$, которая сообщая с двумя прочими, равными по величине фазными магнитодвижущими силами обмотки якоря производит такое же действие, как $I_1 w_1$.

Произведение в главе 19 рассмотрение распределенной обмотки возбуждения магнитного колеса с неявно выраженными полюсами показало, что мы получаем трапецидальный магнитный поток, максимальная плотность силовых линий которого определяется полной магнитодвижущей силой $I_1 w_1$. При исследовании в главе 25 формулы кривой вращающегося магнитного потока трехфазной обмотки якоря мы также получили трапецидальный поток (рис. 63). Максимальная плотность силовых линий этого потока определяется величиной магнитодвижущей силы одной фазы, помноженной на $\sqrt{3}$. При этом нужно принимать в расчет максимальное значение магнитодвижущей силы одной фазы, так что определяющей максимальной плотность силовых линий является величина

$$\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot I_2 w_2 = \sqrt{6} I_2 w_2.$$

Мы можем также оба трапецидальных потока заменить синусоидальными потоками. Мы вправе магнитодвижущие силы написать следующим образом

$$\begin{array}{ll} \text{первичная} & \dots \dots \dots I_1 w_1, \\ \text{вторичная} & \dots \dots \dots \sqrt{6} I_2 w_2. \end{array}$$

В случае вращающейся машины нам приятней иметь дело со стержнями, чем с витками. Два стержня всегда составляют один виток; фазовая обмотка поэтому имеет $2 w_2$ стержней. А весь якорь имеет

$$Z = 6 w_2 \text{ стержней.}$$

В виду этого магнитодвижущая сила обмотки якоря может быть написана следующим образом

$$\frac{I_2 \cdot Z}{\sqrt{6}} = 0,41 I_2 Z.$$

Если в обмотке якоря имеются параллельные соединения, то под I_2 всегда разумеется ток, протекающий в стержне, а под Z — общее количество стержней. Только теперь мы можем охватить принцип действия синхронной машины с неявно выраженными полюсами; теперь мы можем также воспользоваться так называемой характеристикой холостого хода машины, без которой не может быть полностью уяснен процесс образования напряжений. Характеристика холостого хода учитывает магнитное сопротивление машины и его изменения, какие получаются вследствие переменной магнитной проницаемости железа.

Если характеристика холостого хода на рис. 77 связывает магнитодвижущую силу магнитного колеса и соответствующее ей напряжение на обмотке якоря или число силовых линий магнитного потока, то в этом случае она дает нам нечто большее, чем только одно представление о работе машины при холостом ходе. Эта характеристика дает нам возможность сразу найти вторичное напряжение при любой действующей суммарной магнитодвижущей силе машины; характеристика холостого хода имеет значение и для нагруженной машины.

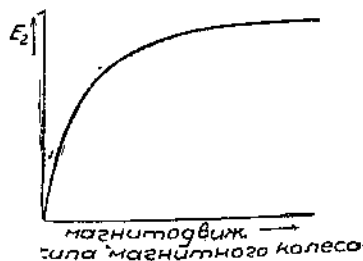


Рис. 77

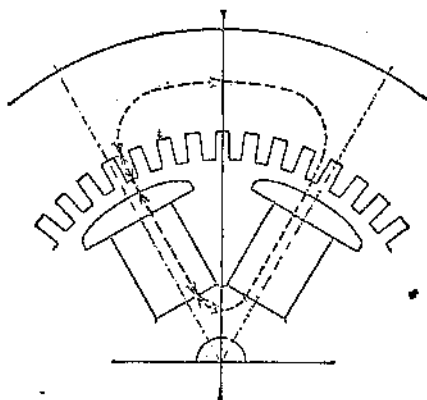


Рис. 78

Как показывает рис. 78, магнитный поток на своем пути через машину должен преодолеть весьма различные по своему характеру магнитные сопротивления. Этот путь можно расчленить на следующие участки: воздушный зазор, зубцы в статоре и роторе, участок в роторе и, наконец, участки в ядре статора и в роторе.

При расчете исходят из некоторого числа силовых линий магнитного потока, принимая во внимание форму кривой магнитного потока; определяют далее плотность силовых линий в отдельных участках, и подсчитывают необходимую для возбуждения магнитодвижущую силу на каждом участке отдельно; затем нужно сложить эти магнитодвижущие силы, после чего мы получим необходимую суммарную магнитодвижущую силу. Этим определяется одна точка на характеристике холостого хода. Повторяя наш расчет, мы найдем еще несколько точек, а тем самым определим и всю кривую.

Несколько хлопотливо и неинтересно определение характеристики холостого хода, но, к сожалению, избежать этого нет возможности. Особенно является неизбежным такой расчет в отношении трансформаторов тока, у которых имеют место разнообразные по числовому значению магнитодвижущие силы на железном сердечнике. У трансформаторов напряжения мы минуем эту неприятность, так как его намагничивающий ток остается практически постоянным. Для трансформаторов напряжения действительный смысл имеет всего лишь одна точка на характеристике холостого хода.

32. УПРОЩЕННЫЕ ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ НАГРУЖЕННОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ.

Синхронная машина с чисто индуктивной нагрузкой обладает, как мы уже убедились, таким магнитным потоком якоря, который непосредственно ослабляет магнитный поток магнитного колеса. Векторная диаграмма рис. 79 дает отчетливое представление о том, какие в этом случае получаются соотношения величин.

При чисто емкостной нагрузке поток якоря усиливает магнитный поток магнитного колеса. Рис. 80 показывает, что в этом случае при заданном возбуждении машины напряжение последней должно повыситься.

На практике случается, что невозбужденный генератор при емкостной нагрузке получит на своих клеммах напряжение, если его магнитное колесо будет обладать только остаточным магнетизмом. Сначала возбуждается в якоре небольшое напряжение, которое создает слабый емкостной ток. Последний тотчас же начинает принимать участие в возбуждении машины, и усиливает напряжение, отчего в свою очередь повышается сила тока.

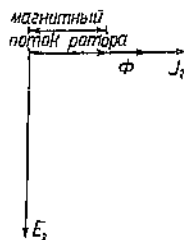


Рис. 79

Нельзя допускать, чтобы магнитодвижущая сила якоря приобретала слишком большое значение, так как нужно создать возможность, чтобы решающее значение на напряжение машины могла иметь магнитодвижущая сила магнитного колеса. Наши синхронные генераторы должны

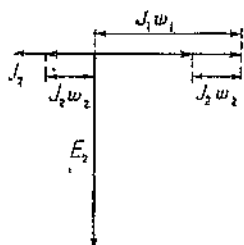


Рис. 80

работать при определенном напряжении и, кроме того, нужно считаться с возрастанием индуктивных нагрузок. Мы должны учесть, что первичный ток машины должен устанавливаться в зависимости от нагрузки, для чего в цепь магнитного колеса вводятся даже специальные регуляторы, но при всем этом мы должны оставаться в не слишком широких рамках. Есть только один выход. Магнитодвижущая сила полностью нагруженной обмотки якоря должна быть мала сравнительно с допускаемой магнитодвижущей силой магнитного колеса. Но возбуждение такой искусственно увеличенной магнитодвижущей

силы магнитного колеса должно быть ограничено. Мы снабжаем поэтому синхронную машину большим магнитным сопротивлением, что проще и лучше всего достигается увеличением воздушного зазора.

Роль большого воздушного зазора в машинах типа трансформатора тока уже достаточно охарактеризована. Он обеспечивает преобладание приложенной магнитодвижущей силы магнитного колеса над вторичной магнитодвижущей силой.

В случае машин типа трансформатора напряжения нужно считаться с необходимостью магнитного равновесия магнитодвижущих сил нагрузки; эти машины возбуждаются всегда только магнитодвижущей силой намагничивающего тока, который, представляя собой известное зло, должен быть взят как можно меньше. В этом случае всякий воздушный зазор является нежелательным; однако в виду его неизбежности, его оставляют, но делают минимальным.

При рассмотрении трансформатора тока мы уже встретились с искажающим действием воздушного зазора; с этим явлением мы снова столкнемся при изучении асинхронных машин. На измерительный

трансформатор, этот единственный случай практического применения статического трансформатора тока, воздушный зазор искажающего действия не оказывает.

Насколько важно преобладание магнитодвижущей силы магнитного колеса, с большой ясностью указывает нижеследующее представление о принципе действия трехфазного синхронного генератора; это представление будет нам полезно также еще в дальнейшем изложении.

Предположим, что всегда при любой нагрузке вторичное напряжение наводится исключительно вращающимся потоком магнитного колеса; при этом действие вращающегося потока якоря оценивается, как падение напряжения. На рис. 81, в соответствии с этим E_2' изображает фиктивное вторичное напряжение, вектор которого должен отставать на четверть периода от вектора вращающегося потока магнитного колеса Φ_m . Вызванное вращающимся потоком якоря падение напряжения, вектор которого E_a , следовательно, должен отставать на четверть периода от вектора тока нагрузки вторичной цепи. Несомненно, что E_2 и E_a должны составить действительное вторичное напряжение E_2 , вектор которого попрежнему образует прямой угол с вектором действующей суммарной магнитодвижущей силы (рис. 81); E_a представляет собой индуктивное падение напряжения.

Данная нами стройная картина нарушается несколько непостоянством магнитного сопротивления машины. Очевидно, что необходимо учитывать то магнитное сопротивление, которое соответствует действительной суммарной магнитодвижущей силе машины. Сравнительно большой воздушный зазор синхронной машины сообщает известную устойчивость магнитному сопротивлению. Если, далее, якорь своей магнитодвижущей силой не в состоянии оказать слишком большого искажающего действия на магнитодвижущую силу магнитного колеса, то кажущаяся индуктивность обмотки якоря останется почти постоянной. Нарисованная картина в общих чертах говорит еще о следующем. Магнитодвижущая сила и вращающийся поток магнитного колеса беспрепятственно наводят напряжение в якоре. Обмотка якоря, наоборот, обладает индуктивным сопротивлением, вызывающим индуктивное падение напряжения. Последнее, конечно, пропорционально току нагрузки и отстает от него на четверть периода.

Став на эту точку зрения, мы уж не можем больше отчетливо различить в принципе действия синхронной машины признаков трансформатора тока, который лежит в основе ее. Мы имеем дело, следовательно, с воображаемой работой машины. Это представление возникло под давлением эксплуатационных условий, в которых находится этот вид трансформатора тока.

Как ко всякому трансформатору тока, к синхронной машине также подводится определенный первичный ток. Последний не меняется до тех пор, пока мы не изменили положения регулятора в первичной цепи. Но зависящее у каждого трансформатора тока от нагрузки вторичное напряжение в случае синхронной машины приобретает особое значение. Нам необходимо иметь напряжение по возможности постоянным, так как нам нежелательны электрические цепи, в которых напряжение то падает, то поднимается. Однако, постоянным является лишь фиктивное напряжение E_2' , которое зависит исключительно от магнитодвижущей силы магнитного колеса. Вместе с током нагрузки колеблется также фиктивное

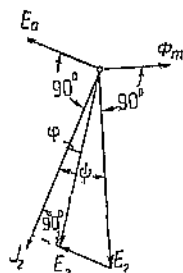


Рис. 81

падение напряжения E_a . В последнем сосредоточена вся трудность образования напряжения в синхронном генераторе; поэтому мы и выделяем и, как бы подчеркиваем падение напряжения и не выпускаем его из виду, совершая при этом известную погрешность в отношении действительной физической картины.

Падение напряжения не должно быть чрезмерным. Оно относится к фиктивному вторичному напряжению E_2^1 , как магнитодвижущая сила якоря относится к магнитодвижущей силе магнитного колеса. Это соотношение величин имеет поэтому на практике большое значение; его мы добиваемся рядом конструктивных приемов; воздушный зазор должен вызывать большую магнитодвижущую силу магнитного колеса, что будет способствовать компенсации действия магнитодвижущей силы якоря.

33. КАЖУЩЕЕСЯ ИНДУКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ВТОРИЧНОЙ ОБМОТКИ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ.

Когда в теории синхронных машин говорится об индуктивном сопротивлении обмотки якоря (реактансе), то под этим всегда разумеют кажущееся сопротивление в том виде, как это было указано в предыдущей главе. Кроме того, имеется, конечно, как и у трансформатора еще действительно индуктивное сопротивление, обусловленное своим существованием вторичному потоку рассеяния, сцепленному только с витками якоря.

Рис. 82 показывает, как ток нагрузки обмотки якоря образует на самом деле собственные силовые линии, не попадающие в обмотку магнитного колеса и использующие подобно тому, как это имело место у трансформатора, узкое промежуточное пространство между обмотками. Эти силовые линии образуют поток рассеяния, а последний создает действительную индуктивность. Действительная индуктивность обмотки якоря всегда на много меньше фиктивной индуктивности. К ней приходится прибегать лишь в том случае, когда нужно подобрать правильную величину суммарного индуктивного сопротивления обмотки якоря. Но какую величину суммарного индуктивного сопротивления следует считать правильной? Разве не нужно выбрать индуктивное падение напряжения минимальным? Разве не следует создавать наиболее благоприятных условий для беспрепятственного действия магнитодвижущей силы магнитного колеса и содействовать, по мере возможности, постоянству рабочего напряжения?

Мы снижаем влияние магнитодвижущей силы якоря, но итти слишком далеко в этом направлении мы не должны. Легко убедиться в том, что увеличенный воздушный зазор в конце концов стоит денег. Если мы увеличиваем число витков обмотки магнитного колеса, не имея возможности при этом уменьшать сечение провода, так как последнее соответствует намагничиваемому току, то этим мы увеличиваем количество затрачиваемой на обмотку возбуждения меди. Кроме того геометрические размеры машины ставят предел усилению первичной обмотки. Начиная с некоторого предела, приходится прибегать к ограничению вторичного тока нагрузки, а, следовательно, к ограничению полезной нагрузки машины. Но соображение об увеличении первоначальных затрат не является единственным аргументом против чрезмерного ослабления влияния

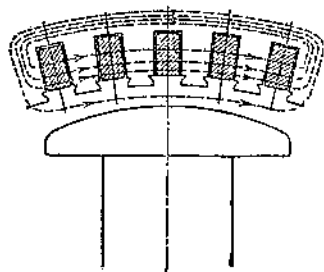


Рис. 82

магнитодвижущей силы якоря. Чисто эксплуатационные причины заставляют нас сохранить индуктивное суммарное сопротивление на известной и при этом значительной высоте.

Например, при коротком замыкании большое индуктивное суммарное сопротивление оказывает хорошую услугу. Не существует электрических цепей, в которых не следовало бы учитывать возможности короткого замыкания. Тем не менее короткое замыкание всегда является нежелательным случаем в эксплуатации, — аварией. Но аварии возможны, даже более того — они вероятны. Наш настоящий совет — считаться с возможностью аварий, в противном случае последние могут обратиться в бедствие.

Короткое замыкание есть, собственно говоря, ненормальное уменьшение нагрузочного сопротивления. Теоретически последнее может дойти до нуля. Когда это происходит, ток нагрузки чрезвычайно вырастает. Магнитное колесо при этом спокойно продолжает вращаться, а первичный ток, не подвергаясь внешнему воздействию, остается тем же. Стержни обмотки якоря попрежнему пересекают силовые линии. Только собственные сопротивления обмотки якоря ставят предел возрастанию тока короткого замыкания; они являются единственными нагрузочными сопротивлениями, которые остаются действовать даже в том случае, если соединить наглухо, без всякого сопротивления, между собой клеммы машины.

У трансформатора также ток короткого замыкания ограничивается только собственным сопротивлением обмотки. Но трансформатор отключается и обесточивается при помощи автоматического выключателя, когда ток нагрузки делается чрезмерным. Генератор же может попасть в гораздо худшее положение.

Мы снабжаем обмотку трансформатора также значительным индуктивным сопротивлением, так как для ограничения тока короткого замыкания мы не можем чрезмерно увеличивать омическое сопротивление, во избежание возрастания потерь. Трансформатор не должен быть сожжен в течение тех нескольких секунд, которые нужны автоматическому выключателю, чтобы произвести выключение. Кроме того, механические усилия при коротком замыкании не должны повреждать конструкцию трансформатора. Вполне понятно после этого, что напряжение короткого замыкания доводят до 10% (сравните главу 10).

В случае синхронных генераторов мы должны быть осторожней. Но в то же время мы можем легче выйти из положения, так как всегда возможно усиливать возбуждение при помощи регулятора. Фиктивная индуктивность, в виду этого, для нас имеет большое значение. Мы выбираем ее достаточной величины, и не боимся доводить величину индуктивного суммарного падения напряжения до 20% рабочего напряжения, если только для этого имеются серьезные основания. Опасность пожара не исключена и для синхронной машины, в случае чрезмерного возрастания тока короткого замыкания; синхронная машина подвержена также разрушительному действию механических усилий, возникающих при коротком замыкании.

34. ВКЛЮЧЕНИЕ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ В СЕТЬ.

По сравнению с индуктивным суммарным сопротивлением обмотки якоря, образуемой частью действительным потоком рассеяния, частью вращающимся магнитным потоком якоря, омическое сопротивление обмотки якоря имеет второстепенное значение. Когда мы будем рассматривать, как ведет себя синхронная машина при включении ее в сеть, можно спокойно пренебречь омическим сопротивлением.

До сих пор мы всегда предполагали, что синхронная машина питает трехфазную сеть в качестве единственного генератора. Теперь мы делаем шаг вперед и считаем, что имеется сеть, уже находящаяся под напряжением, т. е. предполагаем наличие второго питающего сеть генератора. Кроме того, эффективное значение напряжения сети E считаем постоянным.

Приключение синхронной машины к находящейся под напряжением сети не так просто, как это может показаться с первого взгляда. К обмотке якоря приложено со стороны сети напряжение E заданной величины и заданной периодичности. По обмотке якоря ток не будет протекать лишь в том случае, когда вторичное напряжение E_2 , или напряжение на клеммах включаемой машины, равно и прямо противоположно направлению приложенному напряжению

$$E - E_2 = 0.$$

Мы должны включать синхронную машину так, чтобы она первое время работала вхолостую. Из дальнейшего рассмотрения мы увидим, что требуется применение довольно своеобразных приспособлений, чтобы нагрузить уже приключенную синхронную машину. Будем поэтому сначала добиваться холостой работы машины.

Чтобы довести напряжение у клемм E_2 до диктуемой внешними условиями величины, необходимо выполнение двух условий. Прежде всего должны в точности совпадать периодичность машины с периодичностью сети. Машина поэтому должна быть приведена в синхронное число оборотов; она должна быть, как говорят, синхронизирована, прежде, чем включена в сеть. Кроме того, должна быть установлена при помощи регулятора в цепи тока магнитного колеса правильная величина напряжения на клеммах E_2 .

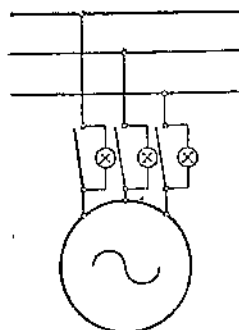


Рис. 83

Во время присоединения машины мы шунтируем (рис. 83) контакты выключателя при помощи ламп накаливания, оставляя при этом выключатель разомкнутым. На эти синхронизационные лампы действует разница напряжений E и E_2 , которые во время пуска неодинаковы и обладают различной частотой. Накал лампочек, как легко видеть, колеблется вместе с разностью частот.

Чем ближе мы подходим к правильному числу оборотов, тем медленней становятся мигания ламп, а накал уменьшается по мере того, как выравниваются напряжения E и E_2 . Наконец, когда лампы останутся темными, то это будет значить, что между контактами выключателя нет напряжения. В этот момент мы должны произвести включение.

Синхронизация при помощи ламп имеет свои трудности. Лампы должны быть рассчитаны на двойное клеммовое напряжение, так как при различной частоте всегда возможен случай встречи максимальных значений E и E_2 . С другой стороны, такие лампы при малых напряжениях не чувствительны. Они остаются темными, даже когда имеется разница напряжений. Наконец, большей частью мы имеем дело с высоким напряжением и поэтому не можем непосредственно применить синхронизационные лампы.

Но, несмотря на это, практика твердо придерживается синхронизационных ламп. Она преодолела печувствительность ламп, и не отступает перед высоким напряжением. Всегда есть возможность заставить гореть лампы во вторичной цепи трансформатора, первичная обмотка которого приключена между контактами выключателя. То обстоятельство, что синхронная машина до приключения к находящейся под напряжением сети,

должна быть приведена в совершенно синхронное число оборотов, — не из приятных. Если машина должна работать, как генератор, чтобы помочь уже нагруженному и питающему сеть генератору, то мы не встретим при выполнении поставленной задачи препятствия. Дело в том, что машина имеет двигатель, который безусловно может ее развернуть. Если синхронная машина применена, как двигатель, то она не имеет приводного двигателя; она должна сама себя развернуть. Синхронный двигатель нуждается в собственном разгонном моторе, который должен сообщить машине предписанное синхронное число оборотов.

Синхронный двигатель имеет неоспоримый недостаток, что он собственными силами, т.-е. работая опять-таки как синхронный мотор, не может развернуться. Он имеет разгонный мотор, обыкновенно, асинхронный, небольшой мощности, достаточной, чтобы некоторое время вращать ненагруженный синхронный мотор. Иногда синхронный двигатель снабжается вспомогательной обмоткой, дающей ему возможность взять с места, как асинхронный мотор. Этим, конечно, не устраняется окончательно его тягеловесность.

Строго рассуждая, нельзя говорить при холостом ходе о синхронном моторе, точно так же как о синхронном генераторе. При холостом ходе, следует говорить вообще о синхронных машинах. Они ни генераторы ни моторы, но могут быть и тем и другим, смотря потому, как с ними поступят в дальнейшем.

В отличие от других моторов, синхронный мотор не может взять сразу нагрузку. Он не в состоянии начать работу с первого же оборота. Он нуждается всегда в самом строгом синхронизме. Своему названию он никогда не изменяет. Конечно это замечательное свойство является большим недостатком, значительно ограничивающим возможности применения синхронного мотора. Но мы должны учесть, что он имеет другие хорошие свойства, благодаря которым он все же применяется. В дальнейшем нашем изложении мы еще вскроем отличные эксплуатационные качества синхронного мотора. Но прежде всего перед нами стоит задача, как получить из работающей вхолостую синхронной машины генератор или же мотор.

35. ВЛИЯНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ НА НАГРУЗКУ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ.

Напряжение на клеммах работающей вхолостую синхронной машины равно, но прямо противоположно по фазе напряжению сети E . Этим обеспечивается равновесие напряжений в обмотке якоря. По обмотке при этом не протекает никакого тока, а машина не берет из сети и не отдает в сеть никакой энергии.

Попытаемся теперь понудить синхронную машину к отдаче в сеть электрической мощности, превратив ее в генератор; для этой цели повысим напряжение на клеммах E_2 , что мы можем произвести увеличением первичного тока в цепи магнитного колеса при помощи регулятора. При этой операции нарушение электрического равновесия в обмотке якоря не должно быть длительным. Получающаяся разница напряжений

$$E_2 - E$$

вызывает прохождение тока. Этой разнице напряжений приходится преодолевать, главным образом, суммарное индуктивное сопротивление обмотки — x_a (омов). Омическим сопротивлением мы пренебрегаем. Возникает чисто индуктивный ток I_2 , а машина остается не нагруженной (рис. 84).

Уменьшением напряжения на клеммах мы также не достигаем цели. Очевидно, что в этом случае в обмотку из сети должен поступить индуктивный ток, так что машина кажется нагруженной емкостным током. И в этом случае не производится никакой полезной работы.

Но этот неудачный опыт наталкивает нас все-таки на удачную идею. Когда мы понуждаем синхронную машину к перевозбуждению отдавать индуктивный ток, то этим самым заставляем сеть отдавать емкостный ток. Таким образом, перевозбужденная синхронная машина представляет для сети емкостную нагрузку.

Для наших сетей трехфазного тока емкостные нагрузки весьма желательны. Наряду с лампами накаливания, представляющими собой чисто омическое сопротивление, мы всегда имеем значительные индуктивности. Асинхронные моторы, подобно трансформаторам, забирают из сети индуктивный ток и ухудшают коэффициент мощности установки. Мы бываем довольны, когда коэффициент мощности установки достигает 0,8. Производство с малыми моторами часто настолько снижает коэффициент мощности электрической станции, что улучшение его является насущной необходимостью. Индуктивные токи нагружают чисто электрически линию электропередачи, генераторы, они повышают тепловые потери, нагревают машины, снижая тем самым их полезную мощность.

Так же, как у трансформаторов, мы не в состоянии снижать намагничивающий ток у работающих асинхронных моторов. Но мы можем искусственно создавать в сети емкостную нагрузку, и тем самым наряду с неизбежными индуктивными токами вызвать прохождение еще емкостных токов. Таким способом мы добиваемся повышения коэффициента мощности установки. Если же искусственная емкостная нагрузка создается перевозбужденной синхронной машиной, то последнюю надлежит устанавливать не на центральной станции, рядом с генератором установки; в этом случае она улучшает коэффициент мощности только генератора, в то время как линия электропередачи попрежнему будет находиться в неблагоприятных условиях. Поэтому придется, кроме того, установить еще особый вспомогательный генератор, который посылал бы в установку индуктивный ток.

Перевозбуждаемая синхронная машина, установленная в конце линии электропередачи, улучшает коэффициент мощности также и линии. Она, можно сказать, отсасывает индуктивный ток установки в месте его образования, не давая ему протекать дальше и значительно уменьшая тем самым его вредные действия ¹.

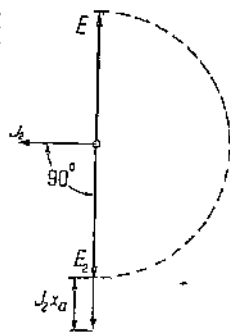


Рис. 84

¹ Компенсирующее сдвиг фаз действие перевозбужденной синхронной машины, работающей при холостом ходе, станет более ясным, если сказать, что она является в этом случае генератором реактивного (намагничивающего) тока, так что потребители последнего получают его уже не от главных синхронных генераторов, установленных на электрической станции, а от указанного генератора реактивного тока, называемого иначе синхронным конденсатором. Поэтому понятно, что в случае установки последнего в конце линии, разгружаются от реактивной нагрузки не только главные генераторы, но и сама линия. При установке же в начале линии разгружаются, естественно, только главные генераторы.

Для предупреждения иногда встречающегося недоразумения следует еще указать, что если роль синхронного конденсатора будет выполнять несколько нагруженная синхронная машина, то ее нужно соответственно перевозбудить независимо от того, работает ли она мотором или генератором.

Прим. ред.

Если, например, установка имеет нагрузку в 1 000 kW, при $\cos \varphi = 0,5$, то она должна иметь генератор на

$$\frac{1000}{0,5} = 2000 \text{ kVA.}$$

Линия должна быть также рассчитана на это же число kVA. Чисто индуктивная нагрузка равна

$$2000 \cdot \sqrt{1 - 0,5^2} = 1732 \text{ kVA.}$$

Вспомогательный перевозбужденный генератор, полностью компенсирующий эту безваттную мощность, должен был быть построен на все 1 732 kVA, т.е. он был бы почти такой же величины, как главный генератор. Представляется совсем не легким делом довести такой коэффициент мощности до высокого значения.

Если мы удовлетворимся улучшением коэффициента мощности с 0,5 до 0,8, то это значит, что снизить мы должны индуктивную нагрузку электрической станции с 1 732 kVA до

$$\frac{1000}{0,8} \cdot \sqrt{1 - 0,8^2} = 750 \text{ kVA;}$$

т.е. мы видим, что все-таки необходима такая синхронная машина, которая была бы в состоянии отдавать оставшиеся 1 000 kVA.

После всего сказанного ясно, что только в исключительных случаях заставляют работать синхронные машины, как чистые компенсаторы фаз. Значительно выгодней применять их одновременно в качестве моторов. Действительно если фазовый компенсатор посылает в сеть 1 000 kVA и одновременно работает как мотор мощностью в 1 000 kVA, то он должен быть построен только на

$$\sqrt{1000^2 + 1000^2} = 1414 \text{ kVA.}$$

В виду этого, вполне уместно установить совместно с многочисленными малыми асинхронными моторами большие синхронные моторы, которые одновременно являлись бы и компенсаторами сдвига фаз. В такой установке они будут служить для сети могучим подспорьем. Малые синхронные моторы ставить не имеет смысла. Асинхронный мотор, ценные качества которого мы узнаем позднее, в области малых мощностей не имеет себе конкурентов.

36. СИНХРОННАЯ МАШИНА, КАК МОТОР. КРУГОВАЯ ДИАГРАММА.

Мы все еще стоим перед неразрешенным вопросом, как работающую холостую синхронную машину заставить работать мотором или генератором. Мы уже убедились в том, что воздействием на напряжение якоря при помощи магнитного регулятора, мы добиться ничего не можем. Другого пути мы пока не видим. Возьмем поэтому, не долго думая, и дадим холостую работающей синхронной машине механическую нагрузку — в виде внешнего вращающегося момента, противодействующего вращению магнитного колеса.

В первый момент, кажется, что магнитное колесо останавливается. По сравнению с синхронным вращением оно отстает на некоторый угол φ . Предположим, что это является единственным последствием нашего опыта, и что после этого внезапного замедления, вращение снова восстанавливается с прежней синхронной скоростью.

Очевидно, что вторичное напряжение E_2 сдвинется на угол φ градусов относительно первоначального напряжения холостого хода; при этом мы всегда при любом числе полюсов будем принимать во внимание один и тот же электрический угол φ . Напряжение сети и напряжение машины уж больше не противоположны по фазе.

Мы получаем векторную диаграмму, согласно рис. 85.

Разность напряжений ΔE сдвинута теперь относительно E и E_2 почти на четверть периода (за вычетом половины нагрузочного угла: $\frac{\varphi}{2}$). Она гонит через якорь нагрузочный ток, остающий от нее на 90 градусов в том случае, когда нужно преодолевать, главным образом, индуктивное суммарное сопротивление обмотки. Нагрузочный ток I_2 почти совпадает с напряжением сети E ; существующий между ними угол $\frac{\varphi}{2}$ ничтожно мал.

Чем больше нагрузочный ток I_2 , тем больше должна быть, конечно, разница напряжений ΔE , а также угол нагрузки φ . Если мы заставим вектора E_2 передвигаться по окружности, при чем угол φ будет принимать все возможные значения, тогда и конец вектора ΔE будет также описывать окружность (рис. 86). Но и расположенный перпендикулярно к ΔE вектор I_2 , вследствие своей пропорциональности ΔE , также, согласно рис. 86, должен описать окружность. Таким образом получается круговая диаграмма синхронного мотора.

Круговая диаграмма синхронного мотора не имеет, однако, под собой твердой почвы. Она предполагает постоянное индуктивное суммарное сопротивление якоря, что является лишь грубым приближением к действительности. При составлении круговой диаграммы пренебрегалось, кроме того, омическим сопротивлением обмотки якоря.

Тем не менее круговая диаграмма очень полезна при изучении работы синхронного мотора. Само построение диаграммы дает представление о том, как синхронная машина переходит в мотор.

Внешняя механическая нагрузка заставляет магнитное колесо отстать на некоторый электрический угол нагрузки φ , тем самым понуждая машину забрать из сети некоторый ток нагрузки. Этот нагрузочный ток I_2 , как известно, создает вращающий момент, устанавливающийся сам собой таким образом, чтоб он уравновешивал приложенный извне момент. Эта игра равновесий происходит при посредстве угла нагрузки φ .

Круговая диаграмма синхронного мотора показывает, в каких пределах может изменяться ток нагрузки. Диаграмма учит нас, что мотор не может повысить свою нагрузку выше некоторой определенной величины. Ваттный ток, очевидно, не может стать больше радиуса окружности рис. 86.

По мере увеличения механической нагрузки мотора, все время увеличивается угол нагрузки, и из сети забирается все большая мощность, в чем заключается приспособление мотора к эксплуатационным условиям. Но эта приспособляемость мотора продолжается лишь до тех пор, пока угол нагрузки не станет:

$$\varphi = 90^\circ$$

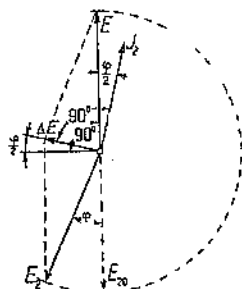


Рис. 85

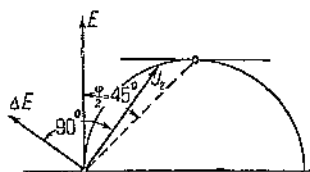


Рис. 86

Здесь мы имеем предел теоретически возможной мощности мотора. Если тем не менее продолжать и дальше повышать механическую нагрузку, то под воздействием взвне угол φ увеличится еще больше, а мощность мотора, напротив, начнет падать, что ясно видно из рис. 86. Угол φ начинает быстро возрастать, и мотор, как говорят, выпадет из такта и остановится. В виду того, что при пуске синхронного мотора могут иметь место большие токи, выпадение из такта превращается в весьма неприятное эксплуатационное свойство синхронного мотора. Необходимо поэтому предусмотреть, чтобы максимально возможный вращающий момент нагрузки не был бы больше опрокидывающего момента мотора.

При этом, конечно, довольствуются возможным. Ведь не исключена при эксплуатации возможность непредусмотренных толчков, опрокидывающих синхронный мотор и выбивающих его из такта. Это не что иное, как эксплуатационные неудачи; последствия их будут тем меньше, чем больше опрокидывающий момент по сравнению с вращающим моментом при полной нагрузке.

37. ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ.

Попутно возникает вопрос, имеющий существенное значение вообще для всех машин переменного тока, но который удобнее всего разрешить именно здесь, при изучении принципа действия синхронных машин. Как обстоит дело с вращающим моментом якорного тока? Какое имеет значение для вращающего момента сдвиг фаз между током якоря и напряжением? Получается ли какой-нибудь вращающий момент от индуктивного тока в фазовом компенсаторе, т.-е. в перевозбужденной синхронной машине, не подвергающейся при этом никаким механическим воздействиям?

Из 17 главы мы знаем, каким образом получается вращающий момент. Моментное значение тока в стержне якоря I_{2t} и плотность пересекаемых при этом силовых линий B_t определяют усилие, действующее в данное мгновение на стержень якоря

$$B_t \cdot I_{2t} \cdot l \cdot 10^{-1} \text{ дин.}$$

Этой же величине равно усилие, оказываемое неподвижным стержнем якоря на вращающееся магнитное колесо.

Наводимое в стержне напряжение всегда пропорционально плотности пересекаемого стержнем магнитного потока. Окружное усилие, поэтому, как и электрическая работа, пропорциональны произведению моментного значения силы тока в стержне и напряжения в нем. Отсюда легко вывести заключение, что средняя величина вращающего момента на протяжении одного периода пропорциональна мощности:

$$E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi.$$

Действительный вращающий момент создается исключительно ваттным током $I_2 \cdot \cos \varphi$. Бездваттный ток в течение одного полупериода имеет направление противоположное тому, какое он имеет в течение следующего полупериода. Колебания же эти по своей абсолютной величине равны. В виду этого, индуктивный ток не имеет вращающего момента и не вызывает никакой механической нагрузки. Из механики известно, что механическая нагрузка выражается произведением вращающего момента на угловую скорость. Таким образом, если машина имеет нагрузку

$$3 \cdot E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi \text{ ватт} = \frac{3 \cdot E_2 \cdot I_2 \cos \varphi}{9,81} \text{ кг.м/сек.}$$

(машина трехфазная, фазовое напряжение равно E_2), то соответственно вращающий момент окажется равным

$$\frac{3 \cdot E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi}{9,8 \cdot \omega_m} \text{ кг/м.}$$

при условии, что число оборотов

$$n = \frac{60 \cdot \omega_m}{2\pi}.$$

В виду очевидной тесной зависимости между мощностью и вращающим моментом, последний часто задают в синхронных ваттах, что сразу указывает ту мощность, которая при заданном числе оборотов дает требуемый вращающий момент. В синхронных машинах с их непогрешимой точностью числа оборотов общий масштаб для мощности и вращающего момента сильно упрощает дело. Но и вращающий момент асинхронных машин часто измеряют в синхронных ваттах, хотя, как мы ниже увидим, асинхронные машины отходят от синхронизма.

При определении вращающего момента синхронной машины на первый взгляд нам мешает та двойственность представлений об их работе, которая получается в результате наших исследований.

В одном случае мы считались только с действующим суммарным магнитным потоком, возбуждаемым совместно магнитным колесом и якорем; мы должны поэтому принимать во внимание вращающий момент только этого действующего суммарного потока. Вторым же нашим предположением было, что весь поток состоит лишь из вращающегося потока магнитного колеса, при чем мы вводили понятие о фиктивном напряжении якоря и фиктивном падении напряжения, вызываемом вращающимся потоком якоря.

Но из векторной диаграммы рис. 81 мы легко усматриваем, что

$$I_2 \cdot E_2 \cdot \cos \varphi = I_2 \cdot E_2^1 \cdot \cos \varphi.$$

В обоих случаях мы приходим к одинаковым результатам и к одинаковым средним значениям вращающего момента. Эквивалентная схема с фиктивными напряжениями и с единственным действующим вращающимся потоком магнитного колеса оказывается приемлемой и при определении вращающего момента и мощности. При изучении принципа действия синхронной машины эта схема имеет то большое преимущество, что она разделяет переменный фактор — магнитодвижущую силу якоря — от постоянного фактора — приложенной извне магнитодвижущей силы магнитного колеса.

Эквивалентная схема окажет нам еще в дальнейшем неоценимую услугу, так как круговая диаграмма, составленная нами для синхронного мотора, ни в коей мере не охватывает все возможности работы этой машины. Круговая диаграмма годится для определенной магнитодвижущей силы магнитного колеса, соответствующей возбуждению холостого хода.

Но теперь мы должны отойти от холостого хода. Синхронный мотор имеет ценные свойства, не проявляющиеся при возбуждении холостого хода. В дальнейшем изложении мы обнаружим эти хорошие качества синхронного мотора.

38. ВЛИЯНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ НА РАБОТУ СИНХРОННОГО МОТОРА.

Синхронный мотор при возбуждении холостого хода не обладает сколько-нибудь выдающимися качествами. Круговая диаграмма рис. 86 ясно показывает, что он забирает из сети отстающий ток и что его коэффициент мощности с увеличением нагрузки ухудшается.

Ухудшение сдвига фаз наших установок, вследствие влияния включенных моторов, является злом, с которым борются на протяжении десятилетий. В главе 36 мы видели, что с этим злом мы можем бороться именно при помощи синхронных машин. В виду этого, круговая диаграмма рис. 86 является несовершенной и не может удовлетворить нас полностью. Глава 35 дает нам указания относительно компенсации сдвига фаз, а именно, нам необходимо усилить возбуждение. Мы можем рассчитывать, что более сильно возбужденный синхронный мотор в первую голову улучшит свой собственный коэффициент мощности.

Действительность не обманет нас в своих ожиданиях. Рис. 87 показывает, как ведет себя синхронный мотор при повышении его возбуждения сравнительно с возбуждением холостого хода.

Окружность вектора E_2 становится больше, конец вектора напряжения сети попадает внутрь этой окружности. В виду этого внутри круговой диаграммы синхронного мотора попадает также точка, в которой начинаются вектора токов нагрузки.

Соотношение между окружностью вектора E_2 и окружностью вектора I_2 не меняется. Окружность вектора I_2 увеличивает свой диаметр точно

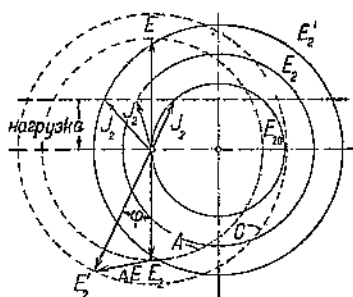


Рис. 87

в такой же мере, как и окружность вектора E_2 ; как легко убедиться, обе окружности сохраняют свои центры.

Для усиленного возбуждения мы получаем новую круговую диаграмму (рис. 87), которая при известной нагрузке соответствует коэффициенту мощности, равному единице. При небольших нагрузках мы можем получить даже опережающий ток. Опрокидывающий момент возрос.

Принцип работы синхронного мотора делается более доступным пониманию при помощи семейства окружностей векторов тока I_2 ,

каждая из которых соответствует определенной магнитодвижущей силе магнитного колеса. На рис. 87 эти окружности обозначены через наведенные магнитным колесом напряжения обмотки якоря E_{20} , E_2^1 , E_2^4 и т. д. Можно, как показывает рис. 87, одну и ту же нагрузку получить при различных возбуждениях, а, следовательно, при различных сдвигах фаз. Само собой разумеется, что в эксплуатации возбуждение устанавливается таким образом, чтобы сдвиг фаз равнялся нулю. Но идут еще дальше и добиваются опережающего тока с целью компенсировать одновременно сдвиг фаз еще и в сети.

Синхронный мотор работает при наилучшем коэффициенте мощности, равном единице. В этом заключается его наиболее ценное качество. В этом отношении, как мы увидим позже, синхронный мотор превосходит асинхронный. Ради способности компенсировать сдвиг фаз, мы прощаем синхронному мотору его недостатки.

Но в главе 35 мы видели, что ценные качества синхронного мотора лишь тогда имеют реальное значение, когда его мощность не слишком мала сравнительно с общей нагрузкой сети.

На работу синхронного мотора оказывает известное влияние также омическое сопротивление обмотки якоря, которым мы пренебрегли в наших прежних рассуждениях. Но не представляет труда выяснить себе дополнительно влияние также и этого фактора.

Если обмотка якоря, кроме суммарного индуктивного сопротивления x_a , имеет еще омическое сопротивление r_a , то разность напряжений ΔE ,

получающаяся в результате поворота магнитного колеса на угол нагрузки φ не будет уже больше пропорциональна индуктивному падению напряжения, вызываемому током нагрузки I_2 . Вместо

$$\Delta E = I_2 \cdot x_a$$

получим

$$\Delta E = I_2 \cdot \sqrt{r_a^2 + x_a^2}.$$

Векторная же диаграмма при нагрузке примет вид, показанный на рис. 88.

Внутренний угол сдвига обмотки якоря φ_i , характеризующийся выражением

$$\operatorname{tg} \varphi_i = \frac{r_a}{x_a}$$

сказывается на величине сдвига фаз тока нагрузки. Вектор индуктивного падения напряжения $I_a \cdot x_a$, как всегда, отстает от вектора тока нагрузки I_2 на 90° .

Отсюда следствие, что диаметр окружности диаграммы, проходящей через начало векторов, образует с горизонтом угол φ_i (рис. 88). Точная круговая диаграмма принимает показанный на рис. 88 вид. Результат получился не хуже, чем раньше. Сдвиг фаз при нагрузке стал еще благоприятней.

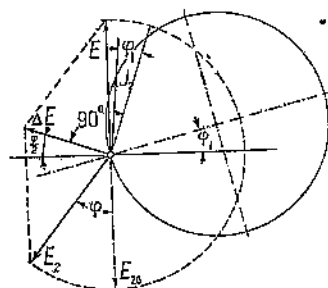


Рис. 88

39. РАБОТА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ ГЕНЕРАТОРОМ.

Работающие вхолостую синхронные машины превращаются в синхронные моторы простым приложением механической нагрузки. Легко заключить, что нужно сделать для превращения синхронной машины в генератор. Для этой цели нужно применить механический привод, действие которого имеет противоположное направление. Мы должны ускорить ход машины механическим путем.

Предусмотренный нами разгонный мотор должен быть пущен более быстрым ходом, или, точнее говоря, должен иметь стремление к более быстрому ходу. Регулятор скорости машины двигателя—паровой машины или турбины—должен быть переставлен.

Работающая вхолостую синхронная машина, под действием внезапного импульса вперед, стремится повиноваться ему. Магнитное колесо поворачивается по направлению движения на угол φ . Мы опять можем рассчиты-

вать на то, что, раз повернувшись на угол φ , машина будет продолжать синхронно вращаться.

Напряжение на клеммах машины, согласно рис. 89, будет опережать напряжение сети на тот же угол.

Возникает разность напряжений ΔE , которая должна быть компенсирована падением напряжения, вызванным возросшим током нагрузки I_2 . Это ток нагрузки, как легко видеть, образует угол $\frac{\varphi}{2}$ с напряжением у клеммы превратившейся в генератор машины. В нашем рассуждении омическим сопротивлением обмотки якоря пренебрегаем.

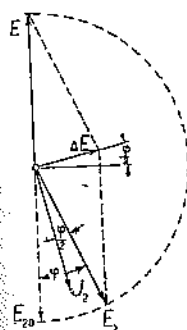


Рис. 89

Таким образом перестановкой положения регулятора скорости машины-двигателя мы заставляем работающую до сих пор вхолостую синхронную машину начать отдавать электрическую энергию. Она начинает принимать участие в производстве электрического тока и помогать главному генератору установки. Он нагружает механически машину-двигатель, затрудняя его ход и восстанавливая синхронное вращение. Эта игра продолжается до тех пор, пока не установится необходимый угол нагрузки φ ; возрастание последнего прекращается, когда при все повышающейся мощности снова наступает синхронизм.

Следует особо отметить, что превратившаяся в генератор машина отдает ток нагрузки, находящийся в строгом соответствии с подводимой механической мощностью. Но, кроме того, когда генератор посылает в сеть ток, он должен приспособливаться к сдвигу фаз нагрузки в сети.

В наших рассуждениях мы, конечно, предполагаем, что напряжение сети не подвергается влиянию со стороны вновь присоединяемой синхронной машины. На самом же деле, разгрузка главного генератора отражается на создаваемом последним напряжении сети. Если учесть это обстоятельство, то окажется легкомысленным загружать новый генератор дополнительными индуктивными токами. При помощи надлежащего возбуждения приключаемой синхронной машины можно всегда добиться, чтобы она принимала участие в отдаче индуктивных токов нагрузки. Поэтому в случае параллельной работы многих генераторов на одну и ту же сеть, они должны управляться частью при помощи регуляторов скорости машин-двигателей, частью при помощи регуляторов, в цепи магнитного колеса. Нагрузка может передаваться по желанию с одной машины на другую. Большое значение как для синхронных моторов, так и для синхронных генераторов, имеет регулируемость магнитного потока магнитного колеса. Таким образом, является недостаточным выполнить обмотку магнитного колеса такой, чтобы она при предусмотренной максимальной нагрузке имела допустимую температуру и создавала необходимую магнитодвижущую силу.

Необходимо предусмотреть известную свободу.

Нужно иметь возможность усилить или ослабить магнитодвижущую силу магнитного колеса. Надо предусмотреть увеличение магнитодвижущей силы для компенсирования сдвига фаз—в случае мотора и для правильного распределения безваттных токов—в случае генератора.

Самой собой разумеется, что магнитодвижущая сила магнитного колеса регулируется изменением первичного тока, т.-е. тока в самом магнитном колесе. Как всякий постоянный ток, он зависит только от омического сопротивления обмотки магнитного колеса и от вызывающего его напряжения. Всегда есть возможность включить в цепь обмотки магнитного колеса регулируемое омическое сопротивление и регулировать таким способом машину. Подобные магнитные регуляторы имеют тот недостаток, что они увеличивают тепловые потери в обмотке магнитного колеса.

Представляется более выгодным регулировать напряжение, вызывающее прохождение первичного тока, через обмотку магнитного колеса. Это напряжение создается возбудителем, маленькой пристроенной машиной постоянного тока; она регулируется, как мы увидим позже, при помощи изменения тока возбуждения возбудителя. Возникшие таким образом шунтовые регуляторы почти не расходуют никакой энергии. Учитывая важность регулировки магнитодвижущей силы магнитного колеса, синхронные генераторы нередко снабжаются и магнитными и шунтовыми

регуляторами. Надежными, безусловно, являются оба регулятора. Но грубо работающий магнитный регулятор больше соответствует чувству опасения за ту ответственную работу, которая лежит на регуляторе.

40. КАЧАНИЯ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ.

Через все описание принципа работы нагруженной синхронной машины красной нитью проходит влияние угла нагрузки φ , на каковой поворачивается магнитное колесо под действием нагрузки. Физические явления, сопровождающие подобное поворачивание, настолько важны, что они вполне заслуживают более подробного разбора.

Синхронная машина жестко связана в своем числе оборотов. При определенной заданной нагрузке оба магнитных потока — поток магнитного колеса и поток якоря — занимают все время постоянное относительное положение. Энергия спокойно переходит с вала машины в сеть или обратно.

Если же механическая сила сдвигает равномерно вращающееся магнитное колесо с его правильного положения и поворачивает его, то при этом, как мы видели, тотчас же возникает другая механическая сила, стремящаяся повернуть магнитное колесо в его первоначальное положение. Эти последняя сила обращена против механического влияния извне, она снова восстанавливает порядок и прежнее правильное синхронное вращение. Эта вот синхронизирующая сила и обусловленный ею синхронизирующий момент в конечном счете и определяют преобразование энергии в синхронной машине. Она всегда восстанавливает механическое равновесие, необходимое для нормального хода магнитного колеса.

При заданном напряжении сети, разница напряжений ΔE , согласно рис. 89, пропорциональна синусу половины угла φ , на который поворачивается магнитное колесо. Обыкновенно мы имеем дело с малыми углами нагрузок. Преобразуемая мощность, а, следовательно, при нормальном ходе и вращающий момент нагрузки, с достаточной точностью пропорциональны углу нагрузки. Кроме того, с выростанием и уменьшением угла нагрузки растет или уменьшается также синхронизирующий момент и синхронизирующая сила.

Синхронизирующая сила по своим свойствам напоминает настоящую, хорошую пружину. Спиральная пружина точно так же, как описанный электромагнитный механизм, сопротивлялась бы поворачиванию магнитного колеса. Магнитное колесо придерживается в своем правильном синхронном положении при помощи пружинящей силы, проявляющей себя при всякой попытке к ее возмущению; действие силы тем больше, чем больше отклонение от первоначального положения.

Но каждое магнитное колесо обладает определенной массой, а следовательно, инерцией. Повернутое под действием скоро переходящего внешнего воздействия магнитное колесо, чтобы попасть в правильное синхронное положение, приходит в колебание. После исчезновения внешнего усилия остается действовать только синхронизирующая сила, которая стремится возвратить магнитное колесо в синхронное положение, ускоряя его и снова затормаживая, когда колесо под влиянием силы инерции переходит через положение синхронизма.

Мы имеем дело с простейшим механическим колебанием. Некоторая масса (рис. 90) движется прямолинейно около точки O под действием центральной силы, проходящей через эту точку и в каждый момент пропорциональной расстоянию центра тяжести массы от точки O .

Если синхронный мотор внезапно сбросит нагрузку, то его магнитное колесо должно быстро перейти в новое синхронное положение. Некоторое время магнитное колесо качается между первоначальным углом нагрузки и таким же углом противоположного знака, следовательно работает некоторое время мотором, а некоторое время генератором, до тех пор, пока сопротивления движению и потери энергии не заставят замереть собственные колебания.

Точно так же и генератор должен прийти в колебательное движение при прекращении подачи к нему механической энергии. Число собственных колебаний зависит, с одной стороны, от синхронизирующей силы, т.е. пружинящей силы и гибкости конструкции, а с другой стороны, от величины массы магнитного колеса. Эксплуатация делается неприятной, когда машина подвергается вынужденным колебаниям, т.е. когда подвод механической энергии претерпевает также периодические изменения. При поршневых машинах подобные качания неизбежны. При этом может случиться, что период собственных колебаний совпадает с периодом вынужденных колебаний, иными словами, наступит явление резонанса.

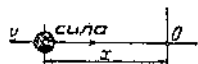


Рис. 90

Последствия этого известны. Отклонения будут становиться при резонансе все больше и больше. Но они не должны, конечно, возрасти выше определенного предела. При $\varphi = 90^\circ$ машина выпадет из такта.

В этом и заключается причина того, что величина маховой массы генераторов должна быть тщательно рассчитана. Число собственных колебаний машины после ее изготовления может быть изменено только при помощи изменения величины вращающейся массы. Единственным средством является маховое колесо, насаженное на вал магнитного колеса.

41. ВЛИЯНИЕ ВЫСТУПАЮЩИХ ПОЛЮСОВ. ТЕОРИЯ ПОПЕРЕЧНОГО ПОЛЯ.

Изложенная в предыдущих главах теория синхронной машины не точна. Понятие о кажущемся индуктивном сопротивлении обмотки якоря вносит некоторую неуверенность. Учитывая это, мы должны сказать, что развитая выше теория годится лишь для машин с неявными полюсами, магнитное сопротивление которых во всех радиальных направлениях одинаково.

Выступающие полюсы приносят с собой добавочные осложнения, которыми мы не можем просто пренебречь. Мы должны познакомиться хотя бы с их природой. Мы не можем поэтому закончить описание принципа действия синхронных машин, не указав влияния выступающих полюсов.

Действие вращающегося потока магнитного колеса не встречает препятствий от того, что магнитное сопротивление машины в различных радиальных направлениях весьма различно и что оно особенно возрастает в промежутке между двумя соседними полюсами. Магнитное колесо по мере передвижения несет с собой постоянство магнитного сопротивления для своего потока. Но вращающийся поток якоря, наоборот, борется с неравномерными сопротивлениями, которые изменяются, смотря потому, какое положение занимает якорь относительно потока магнитного колеса. Если их оси совпадают, то магнитное сопротивление на пути потока якоря мало. Если же его ось сдвинута на 90° электрических градусов относительно оси полюсов, то почти весь поток остается запертым большим сопротивлением на своем пути.

Пунктирная линия на рис. 91 соответствует распределению вращающегося потока якоря при одинаковом воздушном зазоре вдоль всей

окружности. Истинная же кривая потока, очевидно, будет претерпевать сильное падение между полюсами. Таким образом, вращающийся поток якоря ведет себя совершенно различно, когда его ось совпадает с осью потока магнитного колеса или же когда его ось совпадает с серединой промежутка между соседними полюсами. Это явление послужило основанием для создания теории поперечного потока. Разложим магнитодвижущую силу якоря на две составляющие, из которых одна совпадает или направлена противоположно по фазе с магнитодвижущей силой магнитного колеса, а другая слагающая сдвинута по отношению к последней на 90° . Таким способом мы получим векторную диаграмму рис. 92.

Составляющая магнитодвижущей силы якоря, совпадающая по оси с магнитодвижущей силой магнитного колеса, остается полностью в силе. Поперечная же магнитодвижущая сила получается, как было показано на рис. 91.

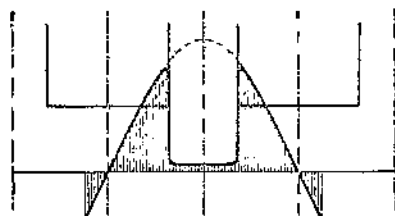


Рис. 91

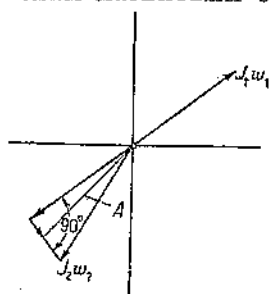


Рис. 92

Линия часть этой силы проявляет себя. Сходство векторной диаграммы синхронной машины с векторной диаграммой трансформатора тока нарушается большим магнитным сопротивлением для поперечного поля. Больше не представляется возможным определить уже известным нам простым способом необходимую магнитодвижущую силу магнитного колеса через заданную магнитодвижущую силу якоря и заданное напряжение.

Проще всего мы снова обретаем правильную точку зрения, если попрежнему представим себе, что наведенное в якоре напряжение зависит только от вращающегося потока магнитного колеса и что вращающийся поток якоря, главным образом, создает только индуктивные падения напряжения. Мы можем тогда рассмотреть отдельно часть магнитного потока якоря, совпадающего по оси с вращающимся потоком магнитного колеса, и отдельно — поперечную часть потока якоря. На рис. 93 видно, что вектор напряжения у клемм приближается тем ближе к вектору фиктивного наведенного напряжения E_2^1 , чем больше ослаблен поперечным потоком.

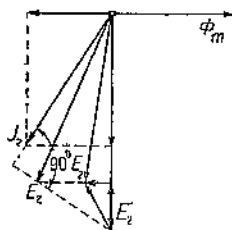


Рис. 93

Это явление с трудом поддается подсчету. Но легко видеть, что машина в магнитном отношении ведет себя так, как будто она имеет добавочный нагрузочный ток, фазы которого противоположны фиктивному наведенному напряжению E_2^1 , при этом ничем не обнаруживается наличие выступающих полюсов. Искажение при этом, однако, обычно не слишком велико. Прежде всего, магнитодвижущая сила якоря, как следует из 33 главы, всегда значительно слабее магнитодвижущей силы магнитного колеса. Кроме того, поперечная магнитодвижущая сила составляет лишь долю магнитодвижущей силы якоря, при чем только часть поперечной магнитодвижущей силы остается без действия.

При очень точных расчетах теория поперечного поля может дать весьма ценную надежность. Но при рассмотрении принципа действия синхронных машин эта теория вносить только усложнения, которые в жизни не столь существенны, чтобы можно было оправдать связанное

с ними нарушение нашего ясного представления о работе машин, которое мы получаем, пренебрегая существованием сопротивления для поперечного поля. С полным основанием мы пренебрегаем описанием дальнейших деталей явления, вызываемых наличием выступающих полюсов и с большой пользой будем считать почти универсальной развитую нам теорию для случая неявных полюсов.

Результаты опыта подтверждают справедливость этого. Результаты расчетов и опыта между собой согласуются, если просто считать, что не существует выступающих полюсов. В конце концов большие воздушные промежутки между соседними полюсами представляют собой не что иное, как большие пазы, в которые закладывается медь обмотки возбуждения.

42. ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ.

Нельзя покончить с теорией синхронной машины, не сказав ничего об ее экономичности, не показав, насколько ослабляется поток энергии после его переработки и не дав себе отчета сколько машина тратит на себя самое.

В качестве трансформатора тока, синхронная машина должна дать приблизительно такую же картину распределения энергии, как статический трансформатор переменного тока; мы вправе поэтому ожидать и от синхронной машины такого же относительно высокого коэффициента полезного действия.

Но легко убедиться в том, что не только синхронная машина, но и вообще всякая вращающаяся электрическая машина работает менее экономично, чем статический трансформатор, если иметь в виду стремление конструктора выжать из применяемых материалов, как можно больше.

Вращающиеся машины прежде всего имеют механические потери, каковые отсутствуют у статического трансформатора. Не существует движения без трения. Подшипники машинных валов развивают тепло; они должны охлаждаться. Вращающееся магнитное колесо должно преодолевать сопротивление воздушного пространства; трение о воздух также требует расхода энергии. Потери на трение уже сами по себе достаточны, чтобы снизить коэффициент полезного действия на несколько процентов. Но не только от этого зависит ухудшение коэффициента полезного действия. Этому способствуют, кроме того, чисто электрические и магнитные потери энергии.

Быстро вращающийся ротор увлекает при своем движении окружающий его воздух. Выступающие полюсы работают при этом, как лопатки. Статор и якорь оказываются помещенными в среду движущегося воздушного вихря. Вполне понятно, что движущийся воздух охлаждает гораздо лучше, чем воздух, находящийся в покое. Поэтому можно допустить в меди и железе значительно большие электромагнитные напряжения материала. А если это возможно, то нельзя этого не делать.

Действительно, медь вращающейся машины выносит такие плотности тока, какие нельзя получить в трансформаторе, даже при масляном охлаждении. Потери в железе не играют у синхронной машины такой роли, как у трансформатора, хотя бы потому, что в железе магнитного колеса потери отсутствуют, так как в нем имеет место только постоянный поток. В виду этого, в железе статора может быть допущена большая плотность силовых линий. Максимальная плотность силовых линий в воздушном зазоре у очень малых машин доводят до 5000 гауссов; при вырастании мощности плотность также постепенно поднимается до 10000 гауссов. Статор с профрезерованными в нем зубцами теряет из-за пазов половину

своего сечения; кроме того последнее уменьшается еще за счет неизбежных промежутков между листами, из которых состоит железное тело статора. В виду этого плотность силовых линий в зубцах превышает 20 000 гауссов.

После зубцов в железном ярме сечение железа сразу увеличивается, и плотность силовых линий может быть взята значительно меньше. Ее нельзя слишком увеличивать во избежание чрезмерного возрастания суммарных потерь в железе.

Таким образом выходит, что подсчет потерь в железе необходимо производить всегда отдельно для зубцов и отдельно для ярма. При этом можно руководствоваться уравнением (6) главы 9.

Нужно предусмотреть также и то обстоятельство, что хотя вращающийся поток распределен по окружности якоря синусоидально, но он стремится распределиться равномерно в ярме статора, чтобы создать себе путь с наименьшим магнитным сопротивлением. Что касается потерь в меди, то Джоулевы потери в обмотке магнитного колеса являются переменными лишь постольку, поскольку регулируется ток возбуждения. Поэтому можно смело считать потери в меди магнитного колеса независимыми от нагрузки. К такой же категории потерь можно отнести потери на трение, а также и потери в железе, так как истинное значение напряжения якоря держится по возможности всегда на одном уровне. Одновременно с нагрузкой возрастают, главным образом, потери в меди якоря. Они так же, как и потери в меди магнитов, определяются на основании уравнения (6) 9 главы.

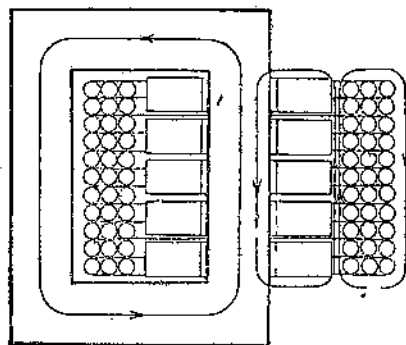


Рис. 94

В случае вращающихся машин добавочным потерям в железе, а также в меди, приходится уделять больше внимания, чем в случае статических трансформаторов. Штамповка пазов увеличивает возможность образования электрических мостиков для вихревых токов, вследствие соприкосновения между собой получающихся при штамповке заусенцев. Чем большее сечение железа охватывается цепью вихревого тока, тем больше сила последнего. Действующая в цепи вихревого тока электродвижущая сила возрастает именно с увеличением охватываемого током сечения железа.

Добавочные потери в меди статора синхронной машины имеют большое значение, во всяком случае гораздо большее, чем в меди трансформатора. Весьма существенно указать на причину, обуславливающую эту разницу.

Добавочные потери возникают, прежде всего, от действия поля рассеяния соответствующей обмотки. Концентрическая обмотка трансформатора, например, развивает такой поток рассеяния, который в промежуточном пространстве достигает максимальной плотности (рис. 94). Линии потока рассеяния, проходящие через промежуточное пространство, на самом деле вызываются полной магнитодвижущей силой обмотки; те линии рассеяния, которые пронизывают саму обмотку, обусловлены только частью магнитодвижущей силы.

Поток рассеяния обмотки якоря проталкивается через воздушный зазор машины, как показано на рис. 82; кроме того, он пронизывает также и само тело пазов. Таким образом, в пазах получается показанная на

рис. 95 картина потока рассеяния. В сущности такую же картину мы получили бы и для потока рассеяния в меди трансформатора.

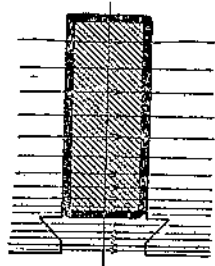


Рис. 95

Посредством нижеследующего рассуждения мы можем с достаточной простотой представить себе возникновение вызванных потоками рассеяния добавочных потерь. Представим себе пронизываемый потоком рассеяния провод состоящим из многих проводящих волокон, из которых одна на рис. 96 выделена. Все волокна включены параллельно, и все они находятся под действием одинакового напряжения.

Но включенные в параллель волокна не все обладают одинаковыми сопротивлениями. Правда, омические сопротивления их равны, если принять одинаковыми ширину волокон или, иными словами, их поперечное сечение. Но индуктивное сопротивление у них разное.

Чем ближе находится волокно к промежуточному пространству, тем меньшее число силовых линий его окружает, тем меньше, следовательно, становится его индуктивное сопротивление.

Последствия этого очевидны. Отдельные волокна обтекаются различными токами; другими словами, ток в проводе распределяется неравномерно по его сечению; плотность тока возрастает по направлению к промежуточному пространству. Плотности тока распределяются по ширине провода, перпендикулярной к направлению силовых линий, как показано на рис. 96.

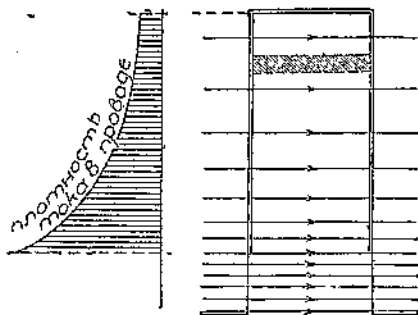


Рис. 96

Естественно, что Джоулевы потери теперь увеличатся по сравнению с поте-

рями при равномерном распределении плотности тока в сечении провода. Эти потери могут возрасти значительно. В своем труде „Трансформаторы“ автором произведен подсчет дополнительных потерь. Подсчет показывает, что отношение этих добавочных потерь к тепловым потерям при прохождении тока при равномерной его плотности растет пропорционально четвертой степени ширины провода, измеренной в направлении перпендикулярном к потоку рассеяния. В виду этого, конструктор должен тщательно следить за тем, чтобы не было чрезмерной ширины проводов. Для трансформаторных обмоток существует такая же опасность, как для обмоток якоря синхронных машин.

Но заложённая в пазах медь должна быть защищена и от добавочных потерь другого рода. Рис. 97 показывает, что над проводом в направлении потока рассеяния главный поток машины повышает свою плотность. Если снова разложить провод на волокна, как показано на рис. 97,

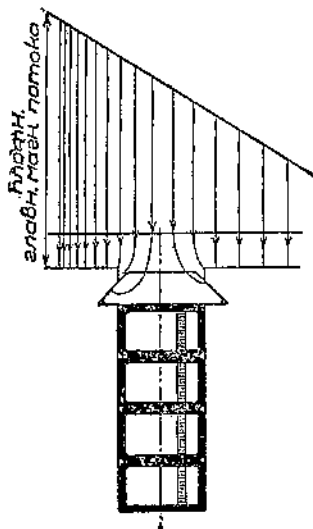


Рис. 97

то мы тотчас же обнаружим, что отдельные параллельно включенные волокна провода пересекают различной плотности силовые линии. Мы опять

придем к неравномерному распределению тока в сечении провода, что имеет последствием добавочные потери. Вот почему заложенные в пазы обмотки предрасположены к гораздо большим потерям, чем обмотки трансформатора. Поэтому открытые пазы избегают применять и защищают обмотку паза от влияния главного магнитного потока, по возможности прикрывая паз со стороны воздушного зазора. Между головками зубцов для паза можно оставлять совсем узкую щель; при этом провода обмотки вкладываются один за другим по очереди. Все же избавиться окончательно от добавочных потерь второго рода почти не удастся.

IV. Асинхронная машина.

43. ВЫПОЛНЕНИЕ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ.

Из теории синхронной машины мы должны сделать вывод, что преобразование энергии происходит при помощи вращающегося потока, возбуждаемого совместным действием обмотки магнитного колеса и обмотки якоря. При этом необходимо особо подчеркнуть, что протекаемая трехфазным током находящаяся в покое трехфазная обмотка имеет такое же действие, как вращающаяся обмотка, питаемая постоянным током.

Постоянный ток возбуждения кажется чуждым в машине трехфазного тока. Непроизвольно возникает желание от него избавиться. И действительно, представляется возможность легко обойтись без него. Мы всегда можем подвести извне к обмотке статора трехфазный ток, вызывающий вращающийся поток. Тогда обмотка магнитного колеса может оставаться без тока и становится излишней.

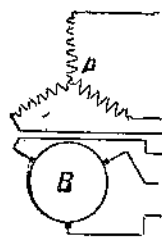


Рис. 98

Мы можем заменить в этом случае все магнитное колесо. Превратим его в железный цилиндр, точно такой, как если бы мы хотели встроить в него распределенную обмотку возбуждения; профрезеруем в цилиндре пазы и обмотаем его. На этот раз, однако, помещаем в него не обмотку постоянного тока, а обмотку трехфазного тока. Статор и ротор оказываются снабженными одинаковыми обмотками. После этого машину можно считать готовой.

Оставляем сначала трехфазную обмотку ротора открытой, т.-е. не будем создавать при помощи сопротивлений цепей тока; таким образом мы не будем иметь ни соединения звездой ни треугольником. Первичная обмотка, наоборот, должна быть присоединена к источнику трехфазного тока, чтобы получить необходимый намагничивающий ток. В результате получится схема рис. 98. К обмотке статора приложен треугольник напряжений. Каждая фаза находится под действием внешнего напряжения. В каждую фазу из сети течет некоторый фазный ток. Обмотка статора при помощи своей магнитодвижущей силы возбуждает вращающийся поток точно таким способом, как это было описано в главах 24 и 25. Угловая скорость вращающегося потока находится уже в известной нам зависимости от числа периодов приложенного напряжения и числа полюсов обмотки статора.

Вращающийся поток пересекает проводники обмотки статора и наводит в них напряжения. Очевидно, что наведенные фазные напряжения должны находиться в равновесии с приложенными извне напряжениями. Приложенный намагничивающий ток возрастает до тех пор, пока

вызванный им вращающийся поток не возбudit достаточной величины противодействующее напряжение.

Но, кроме того, вращающийся поток пересекает проводники ротора. Ротор не имеет пока никакого повода вращаться. В обмотке его наводятся напряжения по тому же закону, как в обмотке статора; напряжения ротора и статора имеют одинаковую частоту. Различие между наводимыми в роторе и статоре напряжениями зависит только от числа проводников. Фазное напряжение в роторе относится к наведенному напряжению в статоре (а следовательно, и к приложенному напряжению), как относится число проводников в роторе к числу проводников в статоре. Можно при этом допустить, что коэффициенты обеих обмоток (см. главу 21) — одинаковы.

Это предварительное описание принципа действия асинхронной машины ни в чем не отличается от данного в главе 3 описания принципа действия статического трансформатора с разомкнутой вторичной обмоткой. Обмотка статора играет роль первичной обмотки, обмотка ротора — вторичной; соотношение числа проводников соответствует соотношению числа витков, а вращающийся поток — главному магнитному потоку.

Не может быть сомнения в том, что асинхронная машина представляет собой нормальный трансформатор, а именно трансформатор напряжений, так как к нему приложено заданное напряжение. Единственно, что нарушает это сходство, это внешний вид. Асинхронная машина кажется с виду построенной совсем иначе, чем статический трансформатор; по существу же она является не чем иным, как именно статическим трансформатором. В действительности всегда возможно выполнить трансформатор по форме асинхронной машины. Если так не делают, то для этого имеются вполне очевидные причины. Дело в том, что обмоточная медь подвержена в зубцах гораздо большей опасности повреждения от действия напряжения, чем на обширном сердечнике трансформатора. Кроме того, незачем снабжать ротор механическими приспособлениями для вращения, раз в трансформаторе он все равно вращаться не должен.

Наконец, зачем создавать между статором и ротором неизбежный воздушный зазор, представляющий собой большое магнитное сопротивление и увеличивающий нежелательный намагничивающий ток? Только в исключительных случаях рекомендуется трансформатору придавать действительно форму асинхронной машины. Это весьма интересное исключение мы рассмотрим далее. Асинхронная машина при всех обстоятельствах нуждается в получении из сети намагничивающего тока. Как и у обыкновенного статического трансформатора, эти фазные намагничивающие токи являются для сети индуктивными. Они всегда ухудшают коэффициент мощности установки.

Поэтому стараются, как и в случае трансформатора, воздушный зазор делать минимальным. Его доводят до десятых долей миллиметра. Чем точнее работа завода, тем меньше может быть сделан воздушный зазор. В этом отношении между синхронной и асинхронной машиной есть существенное отличие, в чем легко убедиться, если вспомнить главу 32. Этим различаются всегда трансформаторы тока от трансформаторов напряжения.

44. АСИНХРОННАЯ МАШИНА, КАК ТРАНСФОРМАТОР.

Но мы должны, наконец, подумать и о том, как нагрузить асинхронную машину. Точно так же, как это было в случае трансформатора, заставим вторичное напряжение (напряжение ротора) подействовать во внешней цепи на некоторые нагрузочные сопротивления. Подобное

приключение делается возможным при помощи контактных колец. Таким образом, получится схема рис. 99.

Теперь, если мы желаем иметь машину неподвижной, необходимо затормозить вал ротора; в этом мы убедимся впоследствии. Представляется полезным провести этот опыт. Через неподвижную обмотку будет тогда протекать ток нагрузки. Эти фазные токи, представляя собой трехфазную систему, очевидно, будут стремиться к созданию вращающегося потока, а следовательно к искажению возбуждаемого статором вращающегося потока. Но подобное искажение недопустимо, так как вращающийся поток статора в том виде, как он возбуждается статором, необходим для поддержания электрического равновесия в его обмотке. Возникает то же явление, как и при нагрузке вторичной цепи статического трансформатора. Первичная обмотка, обмотка статора тотчас же начинает забирать из сети нагрузочные токи, находящиеся в магнитном отношении в равновесии с токами нагрузки обмотки ротора.

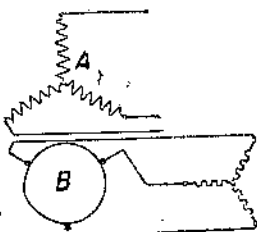


Рис. 99

При одинаковом выполнении обеих трехфазных обмоток — статора и ротора — магнитное равновесие нагрузочных токов наступит, очевидно, при равенстве магнитодвижущих сил. Произведения числа проводников на фазу на фазный ток в роторе и статоре должны быть равны. Оба основных правила трансформации оказываются справедливыми и здесь:

наведенные в статоре и в роторе напряжения прямо пропорциональны, а нагрузочные токи в них обратно пропорциональны числу проводников.

Наряду с необходимым током нагрузки, первичная обмотка асинхронной машины всегда забирает еще намагничивающий ток, который один возбуждает рабочий вращающийся поток. Точно так же же, как в случае трансформатора, можно и в отношении асинхронной машины положить, что суммарная магнитодвижущая сила статора и магнитодвижущая сила нагруженного ротора сообща создают рабочий вращающийся поток. При этом суммарная магнитодвижущая сила статора на много превосходит намагничивающую магнитодвижущую силу. Асинхронная машина с заторможенным ротором является во всех отношениях настоящим трансформатором напряжения; в виду этого представляется почти излишним указывать еще раз, что обе обмотки имеют свое омическое и индуктивное сопротивление, что суммарное падение напряжения в первичной обмотке статора содействует преодолению приложенного напряжения, отчего вращающийся поток может быть меньше; не нужно повторять, что первичное падение напряжения, можно сказать, трансформируется одновременно с приложенным напряжением, и что вторичное падение напряжения со своей стороны, также снижает напряжение на клеммах вторичной обмотки, т. е. на контактных кольцах, по сравнению с напряжением при холостом ходе. Все это можно узнать из 5 главы, и векторной диаграммы рис. 6, так как изложенное в этой главе и показанное на этой диаграмме справедливо и в отношении асинхронной машины с заторможенным ротором.

Некоторое усложнение приносит с собой выполнение трансформатора по форме асинхронной машины. Очень важно разъяснить это усложнение. В статическом трансформаторе первичная и вторичная обмотки всегда занимают одинаковое положение относительно главного магнитного потока. Их оси совпадают с осью главного магнитного потока. В асинхронной машине отдельные фазные обмотки в статоре и в роторе имеют общую ось

лишь в том случае, если повернуть ротор в надлежащее положение и в этом положении затормозить.

Можно, конечно, задержать ротор в любом положении. В этом случае, вообще говоря, две фазные обмотки в статоре и в роторе будут иметь между своими осями некоторый любой угол. Этот угол (рис. 100) лучше всего измерять в электрических градусах. Если этот угол равен α° действительных градусов, то при машине в p полюсов, мы будем иметь:

$$\alpha' = \alpha \frac{p}{2} \text{ электрических градусов.}$$

Как сказывается величина этого угла, мы увидим из содержания следующей главы. Здесь же мы остановимся на одной детали, кажущейся очевидной, но нуждающейся тем не менее в обосновании. Статор и ротор должны обладать обмоткой с одинаковым числом полюсов.

Из главы 24 следует, что трехфазная обмотка вызывает вращающийся поток, угловая скорость которого соответствует числу периодов магнитодвижущей силы. Вращающийся поток делает:

$$n = \frac{120 \cdot f}{p}$$

оборотов в минуту.

При нагрузке магнитодвижущие силы статора и ротора очевидно, будут находиться в магнитном равновесии лишь в том случае, если вызываемые ими вращающиеся потоки будут иметь одинаковое число оборотов. Отсюда следствие, что статор и ротор должны иметь одинаковое число полюсов.

Следует отметить, что равенство числа фаз не является обязательным. Можно выполнить обмотку ротора двухфазной или четырехфазной, а обмотку статора — трехфазной. Всякий многофазный ток возбуждает в правильно выполненной трехфазной обмотке вращающийся поток, на котором не отражается число фаз обмотки возбуждения. Действительно, у асинхронных машин нередко можно встретить двухфазные ротора и часто — четырехфазные.

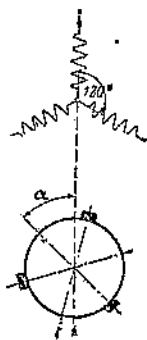


Рис. 100

45. ВРАЩАЮЩИЙСЯ ТРАНСФОРМАТОР¹.

Асинхронная машина с заторможенным ротором представляет собой интересную разновидность статического трансформатора напряжения в том случае, когда ротор установлен таким образом, что соответственные оси обмоток статора и ротора не совпадают.

Вращающийся магнитный поток машины, возбуждаемый магнитодвижущей силой обмотки статора, имеет

$$n = \frac{120 \cdot f}{p}$$

оборотов в минуту и распределяется синусоидально вдоль окружности статора и ротора. Он пересекает проводники статора и ротора. Если предположить, что ротор со своей обмоткой повернут относительно обмотки статора на некоторый электрический угол α_1 в направлении вращения вращающегося потока, то в обмотке статора все будет происходить раньше на некоторое время, соответствующее прохождению потоком угла α_1 .

¹ В русской технической литературе называется еще потенциал-регулятором.

Вращающийся поток своей наиболее плотной частью сначала пересекает обмотку статора и только после прохождения угла α_1 он начнет пересекать этим местом также проводники соответствующей обмотки ротора. Напряжения в роторе отстают поэтому от соответствующих напряжений статора на фазный угол.

Очевидно, что магнитное равновесие нагрузочных токов не должно страдать от искусственно созданного нами сдвига фаз наводимых напряжений. Поэтому, если ток нагрузки ротора совпадает по фазе с вызвавшим его напряжением, то и нагрузочный ток статора должен находиться в фазе с приложенным напряжением.

При равенстве сдвигов фаз между током и напряжением особенно легко установить угол между осью возбуждаемого вторичной обмоткой вращающегося потока и осью вращающегося магнитного потока машины. В каждой из трехфазных обмоток ротора напряжение будет максимальным тогда, когда ось магнитного потока машины будет находиться ровно под углом в 90 электрических градусов по отношению к оси данной обмотки, так как в этот момент ее проводники, очевидно, будут пересекать обладающую наибольшей плотностью часть магнитного потока. В этот же момент фазный ток будет максимальным, и, следовательно, ось вторичного вращающегося потока совпадает по фазе (см. главу 25) с осью фазной обмотки.

Ось вращающегося потока, возбуждаемого магнитодвижущей силой нагрузки, должна совпадать с осью вторичного вращающегося потока, так как в противном случае оба магнитных потока не смогли бы взаимно компенсироваться. Ось первичного вращающегося потока должна составить угол в 90 электрических градусов с действительным вращающимся потоком машины. Это возможно только в том случае, если первичный ток нагрузки будет находиться в фазе с приложенным напряжением и, следовательно, будет прямо противоположен наводимому напряжению.

Из этого рассуждения следует, что фазный угол между током нагрузки и напряжением в статоре и в роторе должен быть одинаков. Только неизбежный первичный намагничивающий ток ухудшает всегда коэффициент мощности, но, как видно из главы 4, это не нарушает баланса энергии.

Таким образом, мы приходим, наконец, к векторной диаграмме (рис. 101), нагруженной асинхронной машиной с заторможенным ротором. По существу эта диаграмма ничем не отличается от диаграммы рисунок 4; поворот ротора на угол α_1 вызывает поворот всех векторов вторичной обмотки на тот же угол. Искусственный сдвиг фазы напряжения ротора на практике весьма изящно используется для регулировки напряжения. Из неподвижной асинхронной машины мы получаем так называемый вращающийся трансформатор, или потенциал-регулятор.

Обмотки статора и ротора вращающегося трансформатора включаются последовательно, так что получается схема рис. 102¹. Обмотка статора приключается к напряжению сети, которое в результате регулировки делается больше на величину роторного напряжения.

Нам задается только величина напряжения ротора, но отнюдь не его фаза. Поворотом ротора мы можем получить всевозможные взаимные положения. На рисунке 103 легко проследить пределы регулирования.

Конечно, как то вытекает из предыдущего, при регулировании напряжения угол сдвига фаз первичного тока нагрузки измениться не может. Баланс энергии должен сохраняться все время. Вращающийся трансфор-

¹ Они могут включаться также и параллельно.

мотор представляет собой простой трансформатор напряжения, работающий, однако, как автотрансформатор, уже известный нам из главы 14.

Вращающийся трансформатор имеет для эксплуатации большое значение. В случае обычного автотрансформатора мы можем регулировать заданное напряжение в известных пределах, если при включении по схеме рис. 26 мы будем иметь возможность изменять число вторичных витков. Но делать это во время работы автотрансформатора нельзя.

Искусственный сдвиг фаз посредством поворота ротора дает нам возможность весьма просто обойти эту трудность. Большей частью идет речь о повышении или понижении напряжения только на несколько процентов. В этом случае на обмотке ротора будет иметь место незначительное

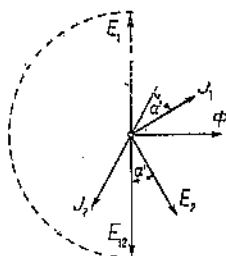


Рис. 101

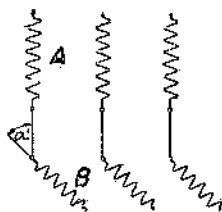


Рис. 102

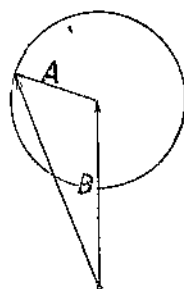


Рис. 103

напряжению, и действительная мощность, на которую должен быть построен вращающийся трансформатор будет, согласно главы 14, всегда значительно меньше требующейся от него кажущейся мощности, составляя часто незначительную часть последней.

46. ВРАЩАЮЩАЯСЯ АСИНХРОННАЯ МАШИНА.

При получении вращающегося трансформатора мы сталкиваемся с затруднительностью поворота ротора на нужный нам угол и фиксирования его в этом положении. Как поворот, так и торможение представляются делом нелегким, так как ротор развивает вращающийся момент.

Легко обнаружить происхождение этого вращающегося момента. Он образуется токами нагрузки и вращающимся потоком. Часто помещают два вращающихся трансформатора на общем валу так, чтобы компенсировались их вращающиеся моменты. У малых машин достаточно иметь поворотный механизм, состоящий из червяка и червячного колеса, обладающих самоторможением. Для обыкновенной асинхронной машины вращающийся момент, конечно, весьма ценен. Он приводит ротор во вращение. Мы должны поэтому присмотреться поближе, как действует этот вращающийся момент.

Уже при первом описании модели электрической машины в главе 17 было показано, что магнитный поток притягивает к себе обтекаемые током проводники вторичной обмотки, если последние находятся под действием наведенного потоком напряжения, или отталкивает их в том случае, когда внешнее напряжение вызывает в проводниках токи, противодействующие наводимому напряжению. Электрически нагруженный ротор будет стремиться следовать за вращающимся потоком.

Что это будет происходить именно таким образом, можно легко убедиться из следующего рассуждения. Вращающийся момент при заторможенном, но электрически нагруженном роторе может иметь произвольную

величину. При отсутствии противодействия в виде извне приложенной механической нагрузки, он будет всегда в большей или меньшей степени ускорять вращение ротора. Но в том случае, когда ротор будет при своем вращении следовать за вращающим магнитным потоком, он будет пересекать силовые линии все медленней и медленней; ток нагрузки в роторе, а вместе с ним и приводящий во вращение ротор вращающий момент будет становиться все меньше. Механически нагруженный, но электрически включенный на внешнюю цепь ротор в конце концов догонит вращающийся поток и начнет с ним вращаться синхронно. Он перестанет тогда пересекать силовые линии, прохождение тока в нем прекратится, действие на него вращающего момента исчезнет.

Ротор до синхронизма доходит, конечно, только теоретически. Трение в подшипниках и о воздух требуют, как известно, небольшого момента. Поэтому асинхронный мотор никогда не доходит до синхронного числа оборотов. Но, если, кроме того, к нему приложена внешняя нагрузка, то мотор, естественно, начнет стремиться отыскать необходимый вращающий момент для преодоления нагрузки. Число оборотов соответственно падает. Эта интересная картина работы мотора показывает нам, что при синхронизме асинхронная машина в электрическом отношении мертва. Работая в качестве мотора, она не должна доходить до синхронизма. Конечно, ее можно довести до числа оборотов, даже выше синхронного, если ее приводить во вращение механическим способом. Она будет увеличивать свое механическое сопротивление с увеличением отклонения от синхронного числа оборотов, но одновременно с этим будет вырастать вторичное напряжение машины.

При переходе через синхронизм направление пересечения проводника ротора с вращающимся потоком, конечно, меняется. Вместе с этим поворачивается на 180° фаза вторичного напряжения, а вместе с тем и фаза вторичных нагрузочных токов. Но магнитное равновесие, как и раньше, должно быть сохранено, так как к первичной обмотке попрежнему приложено внешнее напряжение. Следовательно первичный ток нагрузки также меняет свою фазу, и машина начинает отдавать энергию в сеть и превращается в генератор.

При оборотах ниже синхронных асинхронная машина работает мотором, при переходе через синхронизм — генератором. Но в том и другом случае машина свое название оправдывает. Отклонения от синхронизма, однако, не столь значительны. Асинхронные генераторы применяются редко. Они не самостоятельны, так как они всегда должны получать извне свой намагничивающий ток. Они должны иметь поэтому прежде всего возбуждающий генератор, могущий быть только синхронным. Следовательно асинхронные генераторы могут работать только при наличии уже существующих сетей.

Они создают своим намагничивающим током для сети индуктивную нагрузку. Коэффициент мощности всей установки ухудшается. К этому присоединяется еще то обстоятельство, что при исчезновении напряжения в сети асинхронный генератор также не дает напряжения, так как он остается без возбуждения. При появлении напряжения вновь асинхронный генератор подвергается удару.

Асинхронный мотор, наоборот, является одной из наиболее любимых машин. Его простое выполнение, незыскательность и приспособляемость к колебанию нагрузки сделали его единственным в своем роде мотором трехфазного тока.

Итак мы узнали следующее: синхронные машины, обыкновенно, работают, как генераторы, асинхронные машины — моторами. Синхронные

моторы устанавливаются в особых случаях, они должны обладать большой мощностью и улучшают коэффициент мощности установки. Асинхронные генераторы тоже устанавливаются в особых случаях, но, большей частью на небольшие мощности, ухудшая при этом коэффициент мощности установки.

47. ЧИСЛО ОБОРОТОВ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ. СКОЛЬЖЕНИЕ.

Асинхронные машины при синхронизме не могут развивать мощности, но они не должны тем не менее слишком далеко отклоняться от синхронизма. Разница между числом оборотов вращающегося потока и числом оборотов мотора не превосходит нескольких процентов. Двухполюсный асинхронный мотор, приключенный к 50-периодной сети, делает 2900 оборотов в минуту в то время, как его вращающийся поток имеет

$$n = \frac{50 \cdot 120}{2} = 3000 \text{ оборотов в минуту.}$$

Таким образом, мы получим следующие действительные числа оборотов

при 2 полюсах	2900 об./мин.
„ 4 „	1440 „
„ 6 „	960 „
„ 8 „	720 „

Название свое асинхронный мотор заслуживает не полностью. Действительно, хотя машина и вращается асинхронно, но она настолько сильно связана с синхронным числом оборотов, что в отношении асинхронных машин жалобы на затруднительность регулирования числа оборотов являются вполне основательными; это обстоятельство считается одним из самых серьезных недостатков асинхронной машины.

Почему же это происходит, что ротор должен вращаться почти синхронно? Почему нельзя сообщить ему желательное нам число оборотов, что теоретически, несомненно, возможно?

Ответ на поставленный вопрос можно почерпнуть при более глубоком рассмотрении принципа действия асинхронного мотора. При этом мы получим, сверх ожидания, результат, гораздо более важный. Попутно мы откроем свойство всеобщего трансформатора.

Если p — полюсный статор поставить под напряжение сети с f периодами, то мы получим вращающийся поток с числом оборотов

$$n_1 = \frac{120 \cdot f_1}{p} \text{ в минуту} \dots \dots \dots (15)$$

Ротор, нагруженный электрически и механически, получает n оборотов в минуту, при чем всегда

$$n_1 > n.$$

Относительно ротора поток машины вращается, очевидно, со скоростью n_1 — n оборотов в минуту. Мы выражаем эту относительную скорость в процентах от синхронной скорости и получаем, так называемое, скольжение

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100\% \dots \dots \dots (16)$$

Вращающийся поток пересекает провода статора и ротора с различной скоростью; число периодов наведенного в статоре противодействующего напряжения будет равно опять f_1 , а число периодов

наведенного в роторе напряжения f_2 становится во столько раз меньше, во сколько раз медленней пересекаются потоком проводники ротора. Итак, мы имеем

$$f_2 = f_1 \frac{n_1 - n}{n_1} \dots \dots \dots (17)$$

В главе 28 мы подсчитали при помощи уравнения (14) величину наводимого вращающимся потоком напряжения. Это уравнение можно безоговорочно применить и к асинхронному мотору как для обмотки статора, так и для обмотки ротора. Оно показывает, что в статоре должно наводиться напряжение, отличное от наводимого напряжения в роторе, потому что во-первых у них, вообще говоря, разное число проводников Z_1 и Z_2 , во-вторых вследствие разного числа периодов в статоре и в роторе. Мы можем, следовательно, написать

$$\frac{E_{s1}}{E_{s2}} = \frac{Z_1 \cdot f_1}{Z_2 \cdot f_2} \dots \dots \dots (18)$$

Индекс „1“ всегда относится к статору и к первичной обмотке, а индекс „2“ — к ротору и ко вторичной обмотке.

Если скольжение, как это обычно бывает, будет весьма небольшим, то и число периодов, а также напряжение ротора, будет, сравнительно, малым. При холостом ходе в роторе должно было бы наводиться постоянное напряжение, но последнее, конечно, равно нулю.

Наводимое в роторе напряжение E_{s2} вызывает в приключенных внешних сопротивлениях ток I_2 , при чем, конечно, оно должно преодолеть и собственные сопротивления обмотки. Нагрузочный ток ротора I_2 имеет, очевидно, ту же периодичность f_2 .

Трехфазная обмотка ротора обтекается, следовательно, во время работы током периодичности f_2 , стремящимся вызвать вращающийся поток. Этот вращающийся поток вращается со скоростью

$$n_2 = \frac{120 \cdot f_2}{p} \text{ об./мин.} \dots \dots \dots (19)$$

относительно ротора, по направлению вращения ротора. Относительно статора, согласно уравнений (15), (17) и (19), этот поток будет вращаться со скоростью

$$n + n_2 = \frac{f - f_2}{f_2} \cdot n_1 + n_2 = n_1 \dots \dots \dots \text{ об./мин.}$$

Таким образом вращающаяся нагруженная обмотка ротора оказывается все же в состоянии поддерживать магнитное равновесие по отношению к обтекаемой нагрузочным током первичной обмотке. Она и теперь не искажает вращающегося потока, устанавливающего в статоре электрическое равновесие между приложенным и наведенным напряжением в обмотке статора. Итак, вращающийся асинхронный мотор все еще представляет собой трансформатор.

Магнитное равновесие токов нагрузки как при заторможенном, так и при работающем роторе обеспечивается равенством магнитодвижущих сил от нагрузочных токов

$$-I_1 \cdot Z_1 = I_2 \cdot Z_2 \dots \dots \dots (20)$$

Далее, устанавливаем, что должно иметь место равенство фазного угла между нагрузочным током и напряжением в статоре и в роторе; это с очевидностью вытекает из предыдущей главы.

Как обычно, фазный угол φ в цепи ротора может быть установлен при помощи нагрузочных сопротивлений, но согласно уравнений (18) и (20), всегда будем иметь

$$E_1 \cdot I_1 \cos \varphi = E_{12} \cdot I_2 \cdot \frac{f_1}{f_2} \cos \varphi \dots \dots \dots (21)$$

так как для электрического равновесия необходимо, чтобы

$$E_{11} = -E_1,$$

где E_1 — приложенное напряжение.

Намагничивающий ток, который первичная обмотка, наравне с нагрузочным током, всегда забирает из сети, — для возбуждения вращающегося потока, ни в коей мере не нарушает баланса энергии, выраженного уравнением (21), так как для рабочего напряжения E_1 он представляет собой чисто индуктивную нагрузку.

Уравнение (21) дает возможность сделать одно весьма важное заключение. Забираемая статором мощность $E_{11} \cdot I_1 \cos \varphi$ в роторе расходуется электрическим путем лишь частично. Очевидно, что количеству энергии, израсходованному в омических сопротивлениях, соответствует величина

$$E_{12} \cdot I_2 \cdot \cos \varphi.$$

Мы можем заменить

$$E_{12} \cdot I_2 \cos \varphi = E_1 \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \frac{f_2}{f_1}.$$

Пользуясь уравнением (17), получим

$$100 \cdot \frac{E_{12} \cdot I_2 \cdot \cos \varphi}{E_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi} = 100 \cdot \frac{n_1 - n}{n_1} = \sigma.$$

Скольжение всегда пропорционально количеству выделившегося в роторе от нагревания током тепла; процент скольжения равен тому проценту, какой составят тепловые потери по отношению к подведенной к статору мощности.

Выделившееся в роторе тепло является, конечно, для эксплуатации мотора потерянном. Мы не можем пожертвовать слишком много энергии для нагревания проводников ротора и сопротивлений во внешней его цепи. Мы не должны ухудшать коэффициент полезного действия мотора увеличением скольжения мотора. Это соображение вынуждает нас придерживаться числа оборотов, близкого к синхронному и ограничить скольжение 3—5 процентами.

Но все-таки, теоретически, мы можем по желанию регулировать скорость вращения асинхронного мотора. Для этого достаточно ввести в цепь ротора соответствующее сопротивление и тем увеличить потребляемую ротором мощность и получить желательную нам величину скольжения; однако, подобное регулирование числа оборотов в высшей степени не экономично. Чтобы уменьшить вдвое число оборотов, сравнительно с синхронным, нам пришлось бы снизить коэффициент полезного действия на 50%, вследствие добавочных потерь в цепи ротора.

Вполне правильно поступают, когда проектируют асинхронный мотор так, чтобы он не допускал регулировки числа его оборотов. Это неприятное свойство и то, что коэффициент мощности, зависящий от необходимого намагничивающего тока, в отличие от синхронного мотора, всегда меньше. единицы $\cos \varphi$ — являются слабыми местами асинхронного мотора.

48. ВСЕОБЩИЙ ТРАНСФОРМАТОР.

Возвратимся снова к уравнению (21), указавшему нам на большое значение скольжения. На этот раз для более отчетливого представления о преобразовании энергии перепишем уравнение следующим образом:

$$E_1 \cdot I_1 \cos \varphi = E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi + E_2 \cdot I_2 \frac{f_1 - f_2}{f_2} \cos \varphi.$$

Часть подводимой к статору энергии

$$E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi = E_1 I_1 \cos \varphi \cdot \frac{\sigma}{100} = N_1 \cdot \frac{\sigma}{100},$$

где

$$E_1 I_1 \cdot \cos \varphi = N_1,$$

теряется в качестве омических потерь в обмотке ротора. Остаток

$$E_2 \cdot I_2 \frac{f_1 - f_2}{f_2} \cdot \cos \varphi = N_1 \cdot \left(\frac{1 - \sigma}{100} \right)$$

безусловно может быть использован на валу мотора в виде механической энергии.

Можно еще отчетливей охарактеризовать цепь тока ротора. Она потребляет электрическую энергию

$$E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi = I_2^2 \cdot R_2,$$

где R_2 — омическое сопротивление, содержащееся в цепи ротора, и отдает на вал механическую мощность.

$$I_2^2 \cdot R_2 \frac{1 - \sigma}{\sigma}$$

Итак, имеет место двойная трансформация — электрическая и механическая. Асинхронный мотор представляет собой трансформатор с гораздо более сложной сущностью, чем статический трансформатор. Среди всех прочих электрических машин асинхронный мотор является наиболее ярким примером всеобщего трансформатора.

Легко установить, что двойная трансформация может получиться лишь тогда, когда происходит преобразование числа периодов. Легко убедиться, что электрическая трансформация зависит от соотношения числа периодов в первичной и во вторичной цепи. При заторможенном роторе число периодов в первичной и во вторичной цепи одинаково; вся подводимая к первичной обмотке мощность проявляется во вторичной обмотке в виде электрической энергии, и асинхронная машина представляет собой, таким образом, обыкновенный статический трансформатор.

При освобождении ротора, число периодов во вторичной цепи падает, а вместе с этим уменьшается электрическая мощность вторичной цепи. Векторная диаграмма статического трансформатора все еще остается в силе, но в отношении вторичного напряжения и вторичного тока линия времен перемещается более медленно.

Достаточно присмотреться к синхронной машине, чтобы и здесь узнать, правда, несколько видоизмененные черты всеобщего трансформатора. Если в случае статического трансформатора равенство числа периодов с первичной и вторичной стороны было необходимым условием для чисто электрической трансформации, то в случае синхронной машины полное исчезновение периодичности в обмотке магнитов обуславливает

чисто механическую трансформацию. Подводимая с первичной стороны электрическая мощность равна нулю; вторичная же сторона должна забрать точно такое же количество электрической энергии, какое она отдает механически.

При нашем способе обозначения отдаваемая вторичной обмоткой механическая мощность равна

$$E_2 \cdot I_2 \cos \varphi \cdot \frac{f_1 - f_2}{f_2},$$

а отдаваемая ею же электрическая мощность

$$E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi.$$

В случае синхронной машины, имеем

$$- f_1 = 0$$

следовательно, вторичная обмотка должна отдавать механическую энергию

$$E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi,$$

или же она должна получить механическую мощность

$$+ E_2 I_2 \cos \varphi,$$

чтобы развить такую же электрическую мощность.

Мы можем теперь дать теории всеобщего трансформатора более общее доказательство, которое не основывается на свойствах асинхронной машины; это доказательство строится на том положении, что у всех машин, являющихся разновидностями всеобщего трансформатора, рабочий магнитный поток является результатом одновременного действия первичной и вторичной обмотки.

Если мы, согласно рис. 104, сложим вектор первичной магнитодвижущей силы $I_1 w_1$ с вектором вторичной магнитодвижущей силы $I_2 w_2$, то мы получим вектор действующей результирующей магнитодвижущей силы $I_m w_1$.

В фазе с последней находится вектор рабочего магнитного потока Φ , опережающий первичное и вторичное наведенное напряжение. В случае равенства числа периодов, первичная мощность равна

$$E_1 \cdot I \cos \psi = E_1 \cdot I_1 \cos \varphi_1,$$

а вторичная мощность

$$E_2 I_2 \cos \varphi_2.$$

Значит, когда мы начинали нашу теорию электрических машин со статического трансформатора, мы начинали с крайнего частного случая всеобщего трансформатора. Когда в главе 2 мы провели механизирование трансформации, мы получили синхронную машину, представляющую собой второй крайний случай всеобщего трансформатора. Между этими обоими типами машин находится асинхронная машина, дающая истинное представление о свойствах всеобщего трансформатора. В то время как трансформатор преобразовывает только электрически, а синхронная машина — только механически, асинхронная машина содержит в себе элементы как электрической, так и механической трансформации.

Только сейчас мы познали электрическую машину во всем ее многообразии. Сущность ее заключается в трансформации; средством для достижения этой цели является сцепленный с двумя обмотками магнитный

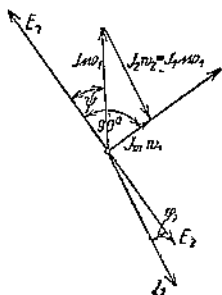


Рис. 104

поток. При помощи индукции магнитный поток вызывает электрическую трансформацию, механической же силой, действующей на обтекаемые током проводники, поток создает механическую трансформацию. Движение обмоток друг относительно друга обуславливает различное по силе действие магнитного потока на них, так как последний относительно одной обмотки движется скорей, чем относительно другой. Но, с другой стороны, относительное движение обмоток дает возможность механической силе отдавать работу.

Всеобщий трансформатор всегда является также и преобразователем частоты. Он, можно сказать, расщепляет приложенное пазное число периодов на две части — электрическую и механическую. Первой пропорциональна трансформируемая электрическая мощность, а второй — механическая мощность.

Всеобщий трансформатор может быть возбужден любой из двух его обмоток. Можно было бы, например, к асинхронному мотору с успехом подводить намагничивающий ток через контактные кольца. В этом случае число периодов подводимого намагничивающего тока должно всегда соответствовать числу периодов роторного тока в данный момент. При описании коллекторных моторов мы еще вернемся к этой своеобразной возможности, позволяющей освободить обмотку статора от прохождения по ней намагничивающего тока и тем самым улучшить сдвиг фаз к первичной обмотке.

49. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ.

При заторможенном роторе наведенное в обмотке ротора напряжение действует на собственные омические сопротивления R_2 и индуктивные сопротивления x_2 , а также, кроме того, на приключенное к контактным кольцам вспомогательное сопротивление R , на которое замкнута цепь ротора. Вторичный ток нагрузки по своей численной величине может быть определен по следующей формуле

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2 + R)^2 + x_2^2}}.$$

Вращающийся ротор имеет тем меньшее напряжение, чем больше в своем вращении он приближается к синхронизму. Простоты ради, в дальнейшем будем характеризовать рабочее состояние в любой момент скольжением σ , при чем последнее будем выражать не в процентах, а в виде правильной дроби.

Если ротор достигнет скольжения σ , то напряжение в роторе получится равным $\sigma \cdot E_2$ вольт, а число периодов в роторе окажется

$$f_2 = \sigma \cdot f_1 \text{ пер./сек.}$$

Омическое сопротивление в цепи тока ротора не изменяется. Зато индуктивное сопротивление, всегда пропорциональное числу периодов, становится меньше и оказывается равным σx_2 омов.

Следовательно, роторный ток при скольжении σ достигнет величины

$$I_2 = \frac{E_2 \sigma}{\sqrt{(R_2 + R)^2 + x_2^2 \cdot \sigma^2}} \dots \dots \dots (22)$$

Это уравнение, очевидно, пригодно и для заторможенного ротора, так как в этом случае

$$\sigma = 1.$$

Как всегда, мотор в роторе потребляет электрическую мощность

$$I_2^2 (R_2 + R).$$

Согласно главы 48, мотор одновременно отдает механическую мощность

$$I_2^2 (R_2 + R) \frac{1-s}{s}.$$

Поучительный результат дает уравнение (22), если его привести к следующему виду

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left[R_2 + R + \frac{1-s}{s} (R_2 + R) \right]^2 + x_2^2}}.$$

Эта формула показывает нам, что ротор работает так, как будто бы он заторможен, а число периодов в нем равняется числу периодов в статоре. Из этого можно сделать заключение, что ротор, кроме действительного омического сопротивления $R_2 + R$, содержит еще фиктивное переменное омическое сопротивление

$$(R_2 + R) \frac{1-s}{s}.$$

Механическая же мощность может быть представлена, как потери на нагревание в этом переменном фиктивном сопротивлении.

Эквивалентная схема рис. 105, в которой напряжение ротора E_2 нужно положить неизменным, как это всегда бывает при заторможенном роторе, вполне отражает работу асинхронного мотора; она весьма остроумно придает трансформированный механической мощности электрическую форму.

Стоит сделать еще один шаг — и мы превратим асинхронный мотор в статический трансформатор и получим вполне совершенную эквивалентную схему рис. 7. Но эта схема годится лишь в том случае, когда статор и ротор имеют одинаковое число проводников. Мы имеем то же положение вещей, как и при составлении эквивалентной схемы статического трансформатора (рис. 9 в главе 6).

Точно так же, как и в том случае, можно и здесь получить всегда правильную эквивалентную схему; для этого при различном числе проводников в статоре и в роторе Z и Z_2 нужно привести роторные сопротивления к числу проводников в статоре. Роторные сопротивления приобретают следующие значения

$$R_2^1 = R_2 \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^2,$$

$$R^1 = R \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^2,$$

$$X_2^1 = X_2 \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^2.$$

Все рассуждения главы 6 применимы и здесь без всяких оговорок. Эквивалентную цепь всеобщего трансформатора можно считать найденной; дальнейшее исследование работы всеобщего трансформатора сводится к изучению полученной нами эквивалентной цепи.

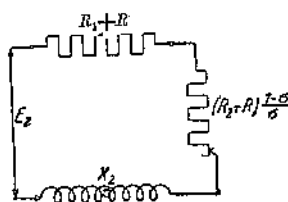


Рис. 105

поэтому точкой короткого замыкания. Вторая важная точка соответствует сопротивлению равному

$$(R_2 + R) \cdot \frac{1 - \sigma}{\sigma} = \infty.$$

При этом

$$\sigma = 0,$$

т. е. мы имеем случай холостого хода — точка холостого хода, местонахождение ее — в бесконечности (рис. 106). При коротком замыкании исчезает механическая нагрузка, так как соответствующие последней потери на нагревание

$$I_2^2 (R_2 + R) \frac{1 - \sigma}{\sigma}$$

одновременно с переменным сопротивлением обращаются в нуль. При холостом ходе пропадает I_2

$$I_2 = 0,$$

а, следовательно, пропадают также и фиктивные потери. Но в дальнейшем мы не можем обойтись определением сопротивления только параллельной ветви, содержащей переменное сопротивление. В виду того, что, в действительности, к обеим параллельным ветвям приложено одинаковое напряжение, то искомым суммарный ток составится из обоих разветвляющихся токов. Мы не знаем, однако, этого напряжения; найти выход из этого положения — не трудно.

Примем это напряжение равным 1. На рис. 107 отложим вектор напряжения, по абсолютной величине равный единицы, в направлении оси y и попробуем отыскать возможные величины векторов тока в параллельной ветви тока, содержащей переменное сопротивление.

Последние имеют величину $\frac{1}{Z}$.

Вектора сил тока и соответствующие им вектора сопротивлений Z занимают симметричное относительно оси y -ов положение, так как напряжения в этом случае опережают ток на тот же угол, что и раньше. Мы переносим поэтому линию векторов Z на левую сторону оси y -сх и наносим по их направлению величину вектора $\frac{1}{Z}$. Зададимся целью узнать, что за кривую представляет собой геометрическое место концов векторов $\frac{1}{Z}$.

Графический способ, заимствованный из теории переменных токов, дает нам на это желанный ответ, а именно, концы этих векторов расположены на окружности, проходящей через начало координат и центр которой лежит на перпендикуляре, опущенном из начала координат на линию векторов Z . Величина диаметра окружности зависит от выбора масштаба.

Пусть на рис. 108

$$\overline{OA} = Z_1, \quad \overline{OB} = Z_2$$

тогда

$$\overline{OA}^1 \text{ должно быть равно } \frac{1}{Z_1}, \text{ а } \overline{OB}^1 = \frac{1}{Z_2}$$

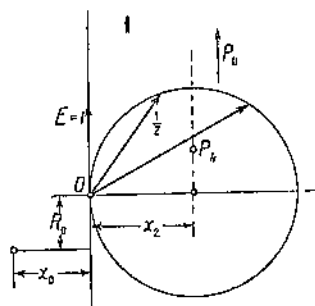


Рис. 107

Точку A поместим на диаметр, положение B произвольно. Мы легко определим, что

$$OAB \text{ подобен } OB^1A^1$$

Поэтому мы имеем, что

$$\overline{OB} : \overline{OA} = \overline{OA^1} : \overline{OB^1},$$

или же

$$\overline{OA} \cdot \overline{OA^1} = \overline{OB} \cdot \overline{OB^1}.$$

Этим подтверждается правильность нашего построения.

Теперь мы имеем окружность векторов $\frac{1}{Z}$, на которой расположены концы векторов всех токов, могущих возникнуть в параллельной ветви, содержащей переменное сопротивление, под действием напряжения, рав-

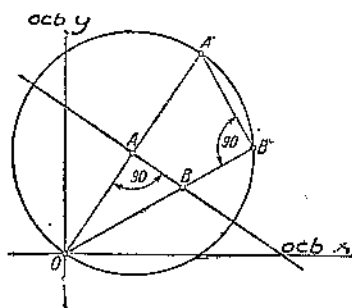


Рис. 108

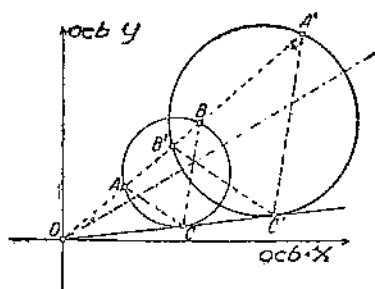


Рис. 109

ного единице. В параллельной ветви эквивалентной цепи, содержащей постоянное сопротивление, мы имеем кажущееся сопротивление

$$\sqrt{R_o^2 + X_o^2}.$$

Следовательно ток, протекающий в этой ветви, согласно рис. 107, окажется равным

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{\sqrt{R_o^2 + X_o^2}}$$

Токи обеих параллельных ветвей совместно образуют возможный суммарный ток. Мы сдвигаем поэтому начало векторов с точки o точку o^1 ; при чем oo^1 соответствует вектору $\frac{1}{Z_o}$; проводя вектора через точку o^1 , мы и определим все возможные суммарные токи в эквивалентной цепи, конечно, при условии, что в месте разветвления токов действует напряжение равное одному вольту. Концы этих векторов лежат на окружности $\frac{1}{Z}$, которая теперь, собственно говоря, превратилась в окружность $\frac{1}{Z} + \frac{1}{Z_o}$. Вектора суммарных токов соответствуют кажущемуся суммарному сопротивлению, при помощи которого обе параллельные ветви заменяются одной эквивалентной. Отсюда легко прийти к заключению, что путем вторичной инверсии окружности $\frac{1}{Z} + \frac{1}{Z_o}$ мы найдем кривую, на

которой находятся концы векторов кажущегося сопротивления Z , заменяющего собой сопротивление обеих параллельных ветвей. Опять расположим окружность $\frac{1}{Z} + \frac{1}{Z_0}$ симметрично относительно новой оси y -ов (рис. 110). В результате инверсии опять получим окружность, а именно, окружность векторов Z . Инверсия произвольно расположенной окружности дает окружность, расположенную относительно центра инверсии симметрично с первой окружностью.

Для доказательства воспользуемся рис. 109. Если обе окружности будут на самом деле занимать подобные положения, то мы будем иметь

$$\overline{OA} : \overline{OB^1} = \overline{OB} : \overline{OA^1}$$

или же

$$\overline{OA} \cdot \overline{OA^1} = \overline{OB} \cdot \overline{OB^1}.$$

Если на первой окружности точка будет перемещаться от A к B по направлению вращения часовой стрелки, то сопряженная точка на второй окружности от A^1 к B^1 будет двигаться по обратному направлению.

Только в том случае, когда окружность проходит через начало координат, обратная кривая обратится в прямую. Инверсия прямой, проходящей через центр инверсии, даст опять ту же прямую.

Теперь, вооруженные изложенной здесь теорией инверсии, мы можем легко последить передвижение обеих точек P_0 и P_k от прямой Z к окружности $\frac{1}{Z}$, а от последней к окружности Z . Но мы еще не достигли поставленной цели. Пока мы знаем только, как может изменяться кажущееся сопротивление Z разветвленной части цепи тока.

Последовательно с ним находится еще постоянное сопротивление

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + Z_1^2}.$$

Кажущееся сопротивление всей цепи тока $Z_1 + Z$ легко определяется графически. Согласно рис. 110 сдвигаем начало с точки O' в точку O'' , при чем

$$O' O'' = Z_1.$$

Вектора возможных кажущихся сопротивлений всей цепи тока имеют начало в O'' и кончатся на окружности Z .

Только теперь мы можем подумать о том, чтобы определить истинный суммарный ток, величина которого, очевидно, определяется выражением

$$\frac{E_1}{z_1 + Z}.$$

Мы должны снова произвести инверсию, для чего предварительно нужно расположить окружность Z относительно новой оси y -ов. На этот раз постоянной инверсией будет служить E_1 .

Таким образом, в результате мы получим круговую диаграмму, т.е. окружность, представляющую собой геометрическое место точек концов векторов тока, протекающих по первичной обмотке; при этом вектор приложенного напряжения E_1 совпадает по направлению с осью y -ов (рис. 111). Точки P_0 и P_k на окружности служат границами возможной работы мотора.

51. КРУГОВАЯ ДИАГРАММА АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ. КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ.

Графический метод при изучении эквивалентной цепи асинхронной машины представляет собой весьма полезное орудие в теории электрических машин; но конечной целью, которую мы достигаем при помощи графического метода, является не выявление сложных зависимостей между различными сопротивлениями, а, наоборот, весьма простой вывод, что конец вектора первичного тока I_1 , принимая последовательно все возможные значения, описывает окружность.

Для того, чтобы более точно изучить принцип действия асинхронных машин, будем исходить прямо из круговой диаграммы рис. 111 без всяких вспомогательных построений. Мы не будем уже больше задумываться над тем, как получилась эта круговая диаграмма, будем считать установленным, что работа всякой асинхронной машины определяется ее круговой диаграммой. Теперь перед нами встает важная задача, почерпнуть из круговой диаграммы то необходимое, что она может нам дать.

Начнем из наиболее легких и доступных вопросов, хотя бы с коэффициента мощности машины. Последний никогда не может достигнуть желанного значения

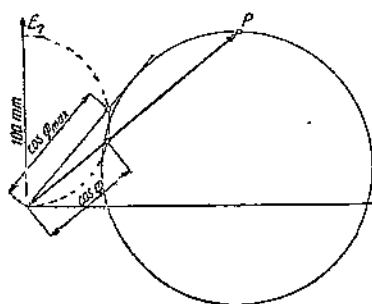


Рис. 112

$$\cos \varphi = 1.$$

По мере увеличения токов нагрузки коэффициент мощности становится все лучше, но он весьма быстро доходит до своего максимального значения; это происходит тогда, когда вектор первичного тока совпадает по направлению с касательной, проведенной через начало векторсов (рис. 112).

На ординате, совпадающей по направлению с вектором приложенного напряжения E_1 , от начала векторов отложим отрезок длиной 100 мм, на котором, как на диаметре, построим вспомогательную окружность. Каждый вектор тока будет на этой вспомогательной окружности отсекает хорду; последняя, измеренная в миллиметрах, даст величину коэффициента мощности в процентах (рис. 112).

Асинхронный мотор должен вблизи своей рабочей точки работать при максимальном коэффициенте мощности. Одним из двух слабостей асинхронного мотора является создание им индуктивной нагрузки сети. Этот недостаток нужно, по возможности, сглаживать.

Ордината любой рабочей точки соответствует первичному ваттному току. Подводимая к асинхронному мотору мощность, при неизменном напряжении сети E_1 , пропорциональна ваттному току. Круговая диаграмма самым простым образом показывает, как от одного эксплуата-

52. ИЗОБРАЖЕНИЕ ПОТЕРЬ В ПЕРВИЧНОЙ ЦЕПИ.

Некоторые результаты круговой диаграммы получаются сами собой. Но еще многое можно получить, если применить некоторые искусственные приемы. Наиболее важный из них тот, который дает нам графическое представление о потерях в статоре. Для этого нам придется провести некоторый расчет. Обозначим координаты центра окружности диаграммы через ξ и η , радиус этой окружности через r ; все эти величины берем в масштабе токов. Тогда уравнение окружности диаграммы получится равным

$$(y - \eta)^2 + (x - \xi)^2 = r^2,$$

где y и x представляют собой переменные координаты рабочей точки.

Отсюда получим

$$J^2 = y^2 + x^2 = 2\eta y + 2\xi x + r^2 - \eta^2 - \xi^2.$$

Потери в обмотке статора, содержащей омическое сопротивление R_1 , окажутся равными

$$V_1 = I^2 R_1 = R_1 (2\eta y + 2\xi x + r^2 - \eta^2 - \xi^2).$$

Можно получить такие теоретически рабочие токи, при которых отсутствуют совершенно потери в обмотке статора. Эти точки все, очевидно, находятся на прямой:

$$y\eta + x\xi + \frac{r^2 - \eta^2 - \xi^2}{2} = 0.$$

Эту линию назовем линией первичных потерь.

Рассуждения предыдущей главы сразу наталкивают нас на мысль, что тепловые потери в обмотке статора должны быть всегда пропорциональны расстоянию соответствующей рабочей точки от прямой первичных потерь.

На прямой, соединяющей начало координат с центром окружности диаграммы, построим вспомогательную окружность, как показано на рис. 114. Центр этой окружности, очевидно, имеет

координаты $\frac{\eta}{2}$ и $\frac{\xi}{2}$, а диаметр ее равен

$$\sqrt{\left(\frac{\eta}{2}\right)^2 + \left(\frac{\xi}{2}\right)^2}.$$

Уравнение окружности гласит

$$\left(y - \frac{\eta}{2}\right)^2 + \left(x - \frac{\xi}{2}\right)^2 = \left(\frac{\eta}{2}\right)^2 + \left(\frac{\xi}{2}\right)^2$$

или, упрощая,

$$y^2 + x^2 - y\eta - x\xi = 0.$$

Обе точки пересечения этой окружности с окружностью диаграммы

$$y^2 + x^2 - 2y\eta - 2x\xi + \eta^2 + \xi^2 - r^2 = 0$$

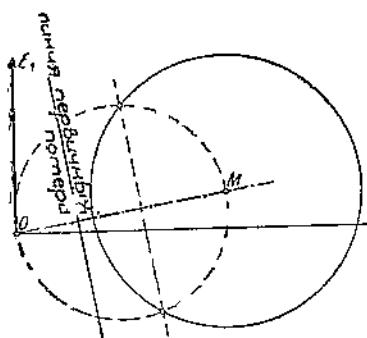


Рис. 114

определяются разностью, полученной при вычитании обоих уравнений

$$y\eta + x\xi + r^2 - \eta^2 - \xi^2 = 0.$$

Эти точки лежат на прямой, соединяющей точки касания двух проведенных через начало координат касательных. Соединительная линия, таким образом, является полярной начала координат по отношению к окружности круговой диаграммы.

Искомая прямая первичных потерь параллельна полюре начала координат. В этом мы тотчас убеждаемся из сравнения уравнений обеих прямых. Кроме того, мы определяем, что ее расстояние от начала координат ровно вдвое меньше, чем расстояние полюры от начала координат. Построение на рис. 114 прямой первичных потерь после всего сказанного чрезвычайно просто. Представляется весьма удобным снабдить круговую диаграмму такой линией, так как она дает весьма изящный способ для наблюдения над изменениями тепловых потерь в статоре. Расстояние в любой момент рабочей точки от прямой первичных потерь может быть всегда легко измерено.

Мы имеем теперь на круговой диаграмме две линии мощностей, а именно прямую суммарной мощности и прямую первичных потерь, расстояния которых до рабочих точек дают соответственно величину суммарной мощности или же первичных потерь. Необходимо здесь же обратить внимание на то обстоятельство, что эти расстояния имеют различные масштабы; следовательно, отрезок длиной в один сантиметр при измерении обоих расстояний не означает одинакового числа ватт. Это с очевидностью вытекает из предыдущего.

На практике обыкновенно вычисляют суммарную мощность и потери первичной цепи для одного и того же рабочего состояния машины. В том случае, когда масштабы различны, можно для облегчения отсчетов применить еще один искусственный прием. Дело в том, что не обязательно при измерении мощностей брать именно вертикальное расстояние. Не нарушая правильности соотношений, можно измерения производить и под некоторым углом, но тогда, обязательно, под этим же углом должны измеряться и все прочие расстояния от соответствующей прямой мощности.

Если мы, например, высчитали, что для некоторого рабочего состояния тепловые потери в первичной цепи равны 1000 ватт, при чем вертикальное расстояние от прямой первичных потерь равно, положим, 86,6 мм, то нам удобней будет расстояния отсчитывать не под углом в 90 градусов, а под углом в 60 градусов; в этом случае мы получим отрезок, равный

$$\frac{86,6}{\cos 30} = 100 \text{ мм.}$$

Следовательно, каждые 10 ватт тепловых потерь будут соответствовать отрезку в 1 мм.

53. ПРЯМАЯ ОСТАЮЩЕЙСЯ МОЩНОСТИ В КРУГОВОЙ ДИАГРАММЕ.

Различные масштабы для расстояний от линий мощностей, обычно, мало нам мешают. Это не затрудняет ни в коей мере дальнейшее развитие круговой диаграммы, для чего мы уже произвели необходимые предварительные работы.

Но мы должны учесть существование различных масштабов в том случае, если, например, мы хотим определить, какая мощность остается

в машине после израсходования определенной мощности на тепловые потери в обмотке статора.

Суммарная мощность N_1 в масштабе K_1 измеряется расстоянием рабочей точки от прямой суммарных потерь, на которой

$$N_1 = 0.$$

Тепловые потери в масштабе K_2 соответствуют расстоянию от прямой первичных потерь, для которой

$$V_1 = 0.$$

Остающаяся мощность N

$$N = k_1 N_1 - k_2 V_1$$

также измеряется расстоянием рабочей точки от линии остающейся мощности, так как

$$k_1 N_1 - k_2 V_1 = 0$$

представляет собой уравнение прямой.

Остающаяся мощность не имеет большого практического значения, но то обстоятельство, что она образует прямую остающихся мощностей, весьма важно.

Поэтому является не лишним привести доказательство этого положения.

Мы имеем

$$N = E_1 y - J^2 R_1 = E_1 \cdot y - R_1 (y^2 + x^2).$$

Для точек, находящихся на круговой диаграмме (другие точки не приходится рассматривать при определении остающейся мощности), справедливо выражение

$$y^2 + x^2 = 2 y \eta + 2 x \xi + r^2 - \eta^2 - \xi^2.$$

В виду этого, получим

$$\frac{N}{2 R_1} = y \left(\frac{E_1}{2 R_1} - \eta \right) - x \xi - \frac{r^2 - \eta^2 - \xi^2}{2},$$

что представляет собой уравнение прямой, а именно прямой остаточной мощности.

Хотя эта прямая не имеет большого практического значения, все же мы постараемся ее построить. Отложим для этого на оси y -ов (рис. 115) от начала координат отрезок $\frac{E_1}{2 R_1}$ и построим на этом отрезке, как на диаметре, вспомогательную окружность. Уравнение последней

$$\left(y - \frac{E_1}{2 R_1} \right)^2 + x^2 = \left(\frac{E_1}{2 R_1} \right)^2,$$

или, упрощая,

$$y^2 + x^2 - y \frac{E_1}{R_1} = 0.$$

Уравнение прямой, на которой пересекается окружность диаграммы с вспомогательной, получается при подстановке в уравнение

$$y^2 + x^2 - 2 y \eta - 2 x \xi + \eta^2 + \xi^2 - r^2 = 0,$$

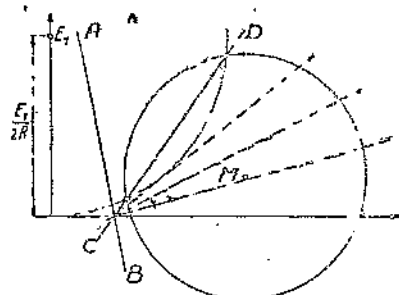


Рис. 115

уравнения

$$y^2 + x^2 - y \frac{E_1}{R_1} = 0,$$

следовательно

$$y \left(\frac{E_1}{2R_1} - \eta \right) - x\xi - \frac{r^2 - \eta^2 - \xi^2}{2} = 0.$$

Это уравнение представляет собой не что иное, как уравнение прямой остаточной мощности.

Все три прямых, представляющие собой суммарную мощность, тепловые потери в статоре и остаточную мощность, должны пересекаться в одной точке. Когда суммарная мощность и остающаяся мощность обращаются в нуль, потери также не имеют места. Три уравнения прямой

$$y = 0, \\ y \cdot \eta + x\xi + \frac{r^2 - \eta^2 - \xi^2}{2} = 0$$

и

$$y \left(\frac{E_1}{2R_1} - \eta \right) - x\xi - \frac{r^2 - \eta^2 - \xi^2}{2} = 0$$

показывают, что их общая точка имеет следующие координаты

$$y = 0; \quad x = \frac{\eta^2 + \xi^2 - r^2}{2\xi}.$$

Линия остающейся мощности применяется для проверки прямой первичных потерь. Кроме того, безразлично с каким диаметром будет построена окружность остаточной мощности. Рис. 115 дает нам возможность легко обнаружить тот факт, что все прямые остаточной мощности, соответствующие различным первичным сопротивлениям R_1 , должны проходить через точку пересечения прямой первичных потерь с осью x -ов. Прямая первичных потерь представляет собой просто прямую токов I^2 . Величина сопротивления R_1 учитывается масштабом, который нужно применить при измерении расстояний от прямой первичных потерь.

54. ИЗОБРАЖЕНИЕ ПОТЕРЬ В ЖЕЛЕЗЕ СТАТОРА.

Напряжение сети E_1 , приложенное к обмотке статора, находится в равновесии с наведенным вращающимся потоком противодействующим напряжением E_{11} и падением напряжения I_{21} . Мы имеем

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + x_1^2}.$$

В эквивалентной схеме (рис. 9) асинхронного мотора наведенное противодействующее напряжение E_{11} действует между двумя точками, в которых происходит разветвление цепи тока. Величина этого напряжения в любой момент определяет интенсивность вращающегося потока.

Потери в железе статора, как потери во всяком пронизываемом переменным магнитным потоком железном теле, пропорциональны квадрату индукции вращающегося магнитного потока. Следовательно, они пропорциональны также квадрату наведенного противодействующего напряжения. В виду этого, было бы желательно представить графически возможные изменения напряжения E_{11} . В эквивалентной схеме рис. 9 омическое сопротивление R_0 , включенное в постоянную ветвь тока, замещает собой тотери в железе. Ток, протекающий по этому сопротивлению, в любой

момент пропорционален напряжению E_{z1} . Таким образом мы получим эквивалентные тепловые потери, поглощаемые в сопротивлении R_0 , замещающие собой потери в железе статора и величина которых почти в точности пропорциональна E_{z1}^2 .

Но каким же способом изобразить E_{z1} на круговой диаграмме? Лучше всего E_{z1} представить в виде остаточного напряжения, получающегося в результате вычитания из приложенного напряжения E_1 падения напряжения $I \cdot z_1$. Вектор приложенного напряжения E_1 неизменно находится на оси y -ов. Нам остается поэтому только найти способ изобразить падение напряжений $I \cdot z_1$.

Кажущиеся сопротивления обмотки статора Z_1 не изменяются. В виду этого падение напряжения I_{z1} может быть представлено просто вектором

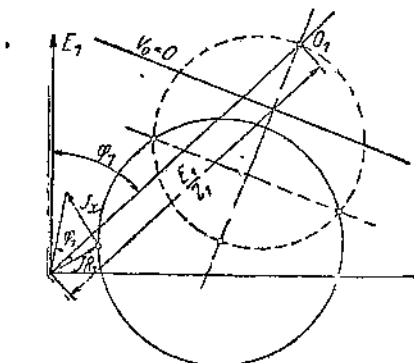


Рис. 115

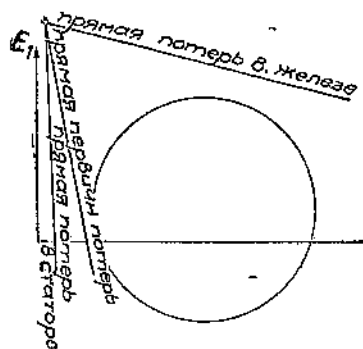


Рис. 117

тока I . При этом нужно только применить в Z_1 раз больший, чем для тока, масштаб.

Итак, вектор тока тотчас определяет падение напряжения по величине, но он не дает представления о направлении вектора падения напряжения. Согласно рис. 116, вектор составляющей напряжения $I R_1$, покрывающей падение напряжения в сопротивлении R_1 , совпадает с направлением вектора тока. Другая составляющая напряжения $I x_1$ опережает ток на 90° . Таким образом, вектор падения напряжения всегда составляет с вектором тока фазный угол φ_1

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{x_1}{R_1}.$$

Для того, чтобы круговая диаграмма правильно отражала изменения вектора падения напряжения, нужно было бы повернуть окружность диаграммы на фазный угол φ_1 . Но представляется, однако, более удобным, оставив окружность диаграммы на месте, повернуть в противоположном направлении на фазный угол φ_1 вектор приложенного напряжения E_1 . Правда, при этом между током и падением напряжения не получается действительного угла сдвига фаз; зато между падением напряжения и приложенным напряжением угол сдвига фаз на диаграмме отвечает действительности. Нам осталось теперь получить оба напряжения в одном масштабе. Падение напряжения показано нами в масштабе токов. Мы должны поэтому, пользуясь масштабами токов, сообщить повернутому вектору E_1 величину $\frac{E_1}{Z_1}$. В этом случае конец этого вектора будет находиться в точке O_1 (рис. 116). Вектора искомого напряжения E_{z1} имеют

начало в точке O_1 и кончаются на окружности диаграммы. В масштабе токов они дают, очевидно, величину $\frac{W_{21}}{Z_1}$ в каждый данный момент. Легко убедиться, что полуполярной точки O_1 относительно окружности диаграммы (рис. 117), является прямая потеря в железе статора. Практически учитываются только потери в железе статора. В железе ротора вращающийся поток имеет малую периодичность, результатом чего является незначительность вызываемых им потерь. В виду этого прямая потерь рис. 117 пригодна для определения потерь в железе. Назовем ее линией потерь в железе

$$V_e = 0.$$

Расстояние любой рабочей точки от прямой потерь в железе дает в некотором определенном масштабе K_3 потери в железе статора.

Суммарные потери в статоре

$$K_2 V_1 + K_3 V_e$$

весьма просто измеряются расстоянием взятой нами рабочей точки от линии потерь в статоре. Так как

$$V_1 = 0$$

есть уравнение прямой тепловых потерь в обмотке статора, а

$$V_e = 0$$

представляет собой уравнение прямой тепловых потерь в железе статора, то уравнение

$$K_2 V_1 + K_3 V_e = 0$$

является также уравнением прямой, в которое достаточно вставить координаты рабочей точки, чтобы получить в правой части, вместо нуля, суммарные потери в статоре.

Одну точку прямой потерь в статоре можно тотчас же отыскать. Точка пересечения прямых

$$V_1 = 0 \text{ и } V_e = 0$$

принадлежит одновременно к прямой

$$K_2 V_1 + K_3 V_e = 0.$$

Вторая точка прямой легко определяется путем простого вычисления суммарных потерь в статоре для любой рабочей точки. В результате мы получим изображенную на рис. 117 диаграмму.

55. ЛИНИЯ ВРАЩАЮЩИХ МОМЕНТОВ НА КРУГОВОЙ ДИАГРАММЕ.

Мощность, передаваемая статором в ротор, получается путем вычитания из подведенной мощности N_1 потерь в обмотке и железе статора. Принимая во внимание масштабы, эта мощность может быть выражена следующим образом

$$K_1 N_1 - K_2 V_1 - K_3 V_e;$$

в это выражение вводятся расстояния от соответствующих прямых мощностей.

На этот раз

$$K_1 N_1 - K_2 V_1 - K_3 V_e = 0$$

также должно представлять собой уравнение прямой, расстояние которой от любой рабочей точки дает величину подводимой к ротору мощности. Назовем ее линией вращающихся моментов.

Линия вращающихся моментов должна проходить через точку, в которой прямая потеря в статоре пересекает ось α -ов (рис. 118). Вторую точку легко высчитать. Линия вращающихся моментов пересекает окружность диаграммы в двух таких рабочих точках, в которых ротор не получает никакой энергии из статора.

Легко определить, что собой представляют эти рабочие точки. Одна из них с малой силой тока несомненно соответствует синхронизму, так как при синхронизме в роторе тока нет, вследствие отсутствия в нем наведенного напряжения при отсутствии тока в обмотке ротора отсутствуют тепловые потери, а также не может быть и рабочего вращающего момента. Вторая рабочая точка соответствует тому положению, когда ротор расходует в виде тепловых потерь всю получаемую им энергию; часть этой энергии поглощается его действительным омическим сопротивлением $R'_2 + R'_1$, а часть ее расходуется в переменном омическом сопротивлении

$$(R'_e + R') \frac{1 - \sigma}{\sigma}.$$

Оба сопротивления, вместе взятые, составляют

$$\frac{R'_e + R'}{\sigma} \text{ ом.}$$

Потребление энергии в этих сопротивлениях не будет иметь места, когда

$$\sigma = \infty.$$

Возникает вопрос, может ли электрическая машина, под воздействием внешнего механического усилия, если можно так выразиться, более чем остановиться, т.е. достигнуть скольжения большего

$$\sigma = 1.$$

На это следует ответить утвердительно. Легко проследить, как это получается.

Представим себе, например, асинхронный мотор, поднимающий некоторый груз при помощи наматывания троса, на конце которого этот груз привешен. Увеличим внезапно его вес. Мотор затормозится, скольжение его увеличится, при чем он разовьет большой вращающийся момент, вызванный увеличенным скольжением. Если же этот момент окажется недостаточным, то мотор остановится и начнет, вследствие непрекращающегося действия груза, даже вращаться в обратную сторону. Скольжение станет больше единицы, вследствие обратного действия числа оборотов мотора. Благодаря возросшим потерям, он работает как тормоз. Теоретически может получиться бесконечно большое значение скольжения.

Но линия вращающихся моментов дает нечто большее, чем два в действительности не имеющих место крайних положения. Она дает нам весьма полное представление о способности мотора к механической нагрузке. Расстояние любой рабочей точки от этой прямой пропорционально развиваемому мотором вращающему моменту. Чтобы в этом убедиться, нам нужно только вспомнить главу 37. Вращающийся момент всегда пропорционален вращающемуся потоку и активному току в роторе. Вращаю-

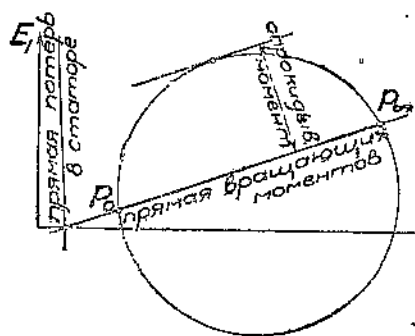


Рис. 118

щемуся же потоку пропорционально наводимое в статоре напряжение E_s , в виду чего передающаяся ротору мощность всегда характеризует величину вращающего момента. Итак, мы видим, что прямая вращающего момента имеет вполне законное право на существование.

Рис. 118 показывает, что асинхронный мотор не может развить вращающего момента больше некоторой определенной величины. В известной рабочей точке возникает опрокидывающий момент; как раз в этой точке касательная к окружности диаграммы параллельна прямой вращающих моментов (рис. 118).

Асинхронный мотор должен работать при значительно меньшем вращающем моменте, чтобы он был в состоянии преодолевать неизбежные в эксплуатации толчки. Часто требуется преодолевать 2—2 $\frac{1}{2}$ -кратный нормальному кратковременный пусковой момент.

Это требование, как показывает рис. 118, весьма хорошо согласуется с ранее указанной необходимостью при нормальной полной нагрузке иметь возможно лучший коэффициент мощности. Почти всегда имеется полная возможность удовлетворить этим обоим эксплуатационным требованиям.

56. ИЗОБРАЖЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В РОТОРЕ. ЛИНИЯ МОЩНОСТИ.

При синхронизме в роторе тока нет. При холостом ходе в нем протекает незначительный ток, величина которого должна быть достаточна для создания необходимого для преодоления трения о воздух и трения в подшипниках момента. С достаточной для практики точностью мы можем начало вектора тока холостого хода в роторе, измененное в отношении числа проводников, положить в рабочей точке вектора холостого хода, конец этого вектора поместить на окружности диаграммы (рис. 119). Ток в статоре всегда составляется из двух частей, из коих одна при равенстве числа проводников равна вторичному току, а другая служит для поддержания вращающегося потока. Вполне понятно, что этот второй частичный ток имеет также свою ваттную составляющую. В статоре при синхронизме имеются также потери, которые нужно покрыть. Эта ваттная составляющая, нанесенная в масштабе токов, точно соответствует потерям в статоре; на нечетной диаграмме рис. 119 она содержит, кроме того, еще потери на трение при холостом ходе.

Изображение тока в роторе на этой диаграмме может быть также дополнено изображением тепловых потерь в нем. Полуполяра синхронной рабочей точки относительно окружности диаграммы, иными словами, касательная в точке, соответствующей положению синхронизма, представляет собой линию тепловых потерь в роторе (рис. 120). Расстояние любой рабочей точки от новой линии потерь дает нам величину тепловых потерь в роторе. Согласно эквивалентной схеме асинхронной машины, в роторе не существует других потерь энергии; передаваемая со статора в ротор энергия проходит дальше в виде механической энергии на вал машины полностью, за вычетом только тепловых потерь в роторе. При малых скольжениях в роторе не происходит практически ощутимых потерь энергии, так как работа, идущая на преодоление трения о воздух

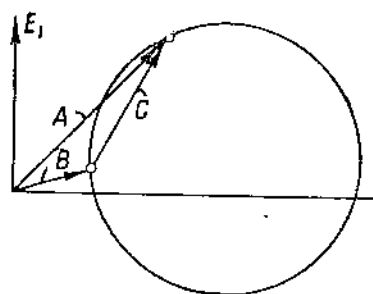


Рис. 119.

и в подшипниках, уже включена в величину механической мощности мотора и должна, как мы увидим дальше, быть вычтена из последней.

Периодичность изменения вращающегося потока в железе ротора равна периодичности в самом роторе. Этот поток вызывает потерю энергии вследствие выделения тепла от вихревых токов и перемагничивания, но при 3,5 или даже 15% скольжении эти потери энергии очень малы, и ими можно пренебречь.

При коротком замыкании потери энергии в железе ротора оказываются весьма значительными, но они возрастают еще больше при отрицательных скольжениях. Во всяком случае, мы вводим в круговую диаграмму ошибку, когда совершенно пренебрегаем потерями в железе ротора, но эта ошибка сказывается лишь в рабочих точках с большим скольжением, существование которого практически не учитывается.

После этого замечания мы можем, не колеблясь, учитывая величину масштабов, объединить линию вращающих моментов

$$N = k_1 N_1 - k_2 V_1 - k_3 V_e = 0$$

с линией числовых значений потерь в роторе

$$V_2 = 0$$

и получить тем самым линию механической мощности

$$N_2 = k_4 N - k_5 V_2.$$

Расстояние любой рабочей точки от этой прямой дает возможность измерить соответствующую точке механическую мощность мотора.

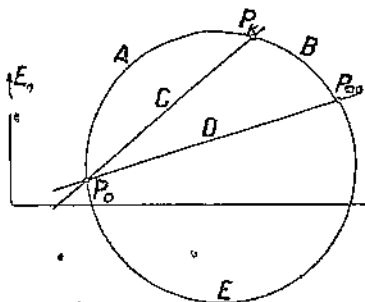


Рис. 121

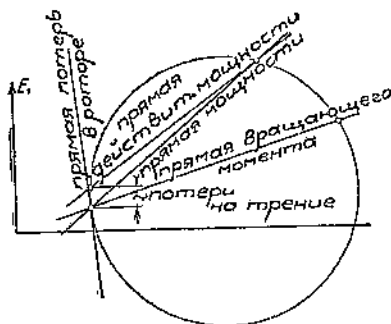


Рис. 122

Линия мощности, согласно рис. 121, должна проходить через точку пересечения линии вращающих моментов с линией тепловых потерь в роторе, т.е. через рабочую точку, соответствующую синхронизму. Как легко убедиться, она проходит также через точку пересечения оси x -ов являющейся линией суммарной мощности, с линией суммарных потерь.

$$V = k_2 V_1 - k_3 V_2 - k_5 V_2 = 0.$$

Наконец, это прямая пересекает точку короткого замыкания P_k , т.е. рабочую точку заторможенного ротора, соответствующую скольжению:

$$s = 1.$$

Правильно поступают, когда, на практике проводят линию мощности через точку короткого замыкания P_k , но при этом, согласно рис. 122 ведут эту прямую несколько выше — через точку P_0 холостого хода, а не через точку, соответствующую синхронизму. Этим мы выделяем из общей механической мощности мотора потери на трение о воздух и подшипниках, получающиеся при холостом ходе, но не имеющие места при коротком замыкании. Тогда линия мощности пересекает ось x -ов в точке, через которую проходит линия действительной мощности, учитывая также трение о воздух и в подшипниках.

Круговая диаграмма асинхронного мотора имеет такое большое практическое значение потому, что она во всякое время может быть легко составлена. У всякого мотора при холостом ходе и коротком замыкании можно произвести измерения. Опыт холостого хода доступен всегда. Короткого замыкания мы добиваемся тем, что затормаживаем якорь, а к статору подводим напряжение такой величины, чтобы в обмотках не могло произойти повреждения. Мы предполагаем при этом, что ток короткого замыкания пропорционален приложенному напряжению, считая, что индуктивное сопротивление обмоток зависит только от числа периодов.

Как при холостом ходе, так и при коротком замыкании измеряются ток, напряжение и подводимая мощность, например J_1 , E_1 и N_1 . В этом случае будем иметь

$$N_1 = E_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi,$$

откуда сейчас же определяем коэффициент мощности, что дает нам возможность зафиксировать точку холостого хода P_0 и точку короткого замыкания P_k .

Обе эти точки определяют собой линию мощности, но они не дают еще возможности получить окружность диаграммы. Последняя может быть построена только при помощи эквивалентной схемы. С достаточной для практики точностью, согласно рис. 123, мы можем провести через точку холостого хода ординату, разделить пополам промежуток между P_0 и вектором тока короткого замыкания и провести через эту среднюю точку параллель оси x -ов. Перпендикуляр, восстановленный из середины отрезка $P_0 P_k$, пересекает эту параллель как-раз (рис. 123) в центре окружности диаграммы. Это простое построение предложено Arnold'ом в его книге „Wechselstromtechnik“, том VI, стр. 103. Для практических целей подобное построение вполне достаточно.

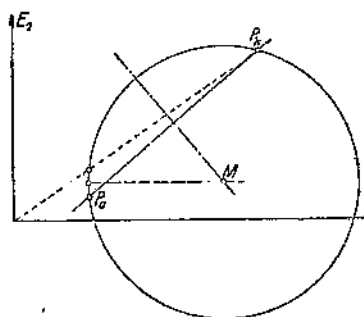


Рис. 123

57. ЗНАЧЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ РОТОРА. ВЕЛИЧЬЕ КОЛЕСО И ФАЗНЫЙ РОТОР.

Полезная механическая мощность асинхронного мотора меньше передаваемой статором в ротор мощности на величину тепловых потерь в роторе. Линия мощности и линия вращающего момента при весьма малых омических сопротивлениях в цепи ротора должны совпадать.

Желая получить механическую мощность асинхронного мотора, мы хотели бы повернуть вокруг точки холостого хода в круговой диаграмме

линию мощности в положение линии вращающего момента. Но полностью сделать это никогда не приходится. Мы скоро убедимся в том, что гораздо лучше, если мы будем добиваться желанного результата непосредственным путем.

Из цепи ротора возможно удалить всякое излишнее сопротивление, если обмотки не присоединены посредством контактных колец ко внешним сопротивлениям, а замкнуты между собой накоротко. Из обоих омических сопротивлений R_2 и R , введенных нами в эквивалентную схему асинхронного мотора, R пропадает совершенно; остается лишь собственное сопротивление R_2 обмотки.

Увеличением сечения проводников ротора также можно уменьшить величину R_2 . В этом смысле идеальное решение получается при так называемом беличьем колесе. Асинхронные моторы с непосредственно замкнутой накоротко обмоткой ротора, как говорят, с коротко-замкнутым

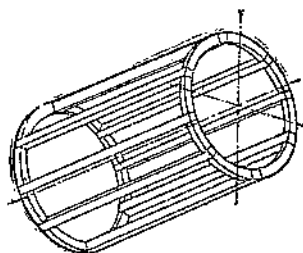


Рис. 124

якорем, имеют всегда обмотку наподобие беличьего колеса. Обмотка по типу беличьего колеса представляет собой многофазную обмотку ротора. Она имеет столько же фаз, сколько проводников; в каждом пазу находится только один проводник. Торцевое соединение обмотки осуществляется при помощи медного кольца, перекрывающего выходные отверстия пазов и замыкающего проводники при выходе последних из паза. Точно такое же медное кольцо замыкает накоротко проводники с другой стороны ротора. На рис. 124 осуществлена полностью обмотка по типу беличьего колеса.

В роторе можно допустить, как упомянуто в главе 44, всякую правильно исполненную многофазную обмотку. Вращающийся поток наводит в ней фазные напряжения, под действием которых возникает многофазный ток. Из главы 25 известно, что многофазные токи в многофазной обмотке вызывают вращающийся поток. Из этого мы делаем вывод, что ротор по типу беличьего колеса работает правильно. То обстоятельство, что фазные напряжения фазного колеса весьма незначительны, позволяет весьма полно использовать пространство пазов. Сечение меди в проводниках относительно велико, так как увеличению сечения не препятствует необходимая прежде изоляция. Тепловые потери в беличьем колесе получаются весьма малыми, что дает весьма хорошее использование переданной со статора в ротор мощности.

Асинхронный мотор с ротором по типу беличьего колеса работает с большим коэффициентом полезного действия, чем мотор с контактными кольцами; он является самым безукоризненным мотором из всех существующих. Кроме того, он дает возможность сэкономить потери на трение, связанные с присутствием щеток, налегающих на контактные кольца. Но беличье колесо, к сожалению, кроме своих больших достоинств, имеет еще большие недостатки, весьма сильно ограничивающие его применение. Беличье колесо с трудом трогается с места и забирает поэтому из сети весьма большой пусковой ток.

Круговая диаграмма весьма быстро нам показывает, что уменьшение тепловых потерь в роторе и приближение линии мощности к линии вращающего момента имеет не только хорошие, но и плохие последствия.

В момент приключения мотора к сети ротор его еще остается недвижим. Всякий асинхронный мотор начинает с короткого замыкания, пробегает все рабочие точки круговой диаграммы, следуя по порядку

от точки короткого замыкания по направлению к точке холостого хода, и останавливается в той рабочей точке, которая соответствует его механической нагрузке. Но, чтобы асинхронный мотор мог взять с места, он должен уже при коротком замыкании развить достаточный вращающий момент. Пусковой момент в большинстве приводов должен быть значительно больше рабочего вращающего момента. В действительности, как показывает круговая диаграмма, пусковой вращающий момент тем меньше, чем ближе расположена на круговой диаграмме точка короткого замыкания к линии вращающего момента.

Если бы удалось полностью удалить омическое сопротивление ротора, следовательно, совместить линию мощностей с линией вращающего момента, то пусковой вращающий момент, вообще говоря, исчезнет, и мотор не сможет взять с места.

Вот почему моторы с коротко замкнутым якорем с трудом снимаются с места и применяются в виде исключения только там, где достаточно иметь малый начальный вращающий момент. Вентиляторы, пропеллеры и центробежные моторы довольствуются малым пусковым моментом.

Тепловые потери в роторе должны быть малы, чтобы повысить коэффициент полезного действия мотора; с другой стороны, эти потери должны быть велики, так как им пропорционален пусковой вращающий момент. Как было уже замечено в 48 главе, вращающий момент пропорционален передаваемой со статора в ротор мощности. При коротком замыкании же со статора переносится в ротор только энергия, необходимая для покрытия тепловых потерь в роторе.

Из этого трудного положения, в которое нас завел вопрос о величине тепловых потерь в роторе, имеется весьма благоприятный выход.

Ведь, тепловые потери в роторе не должны быть слишком малы только в момент пуска. Во время хода мотор все равно работает в таких рабочих точках, которые соответствуют достаточным вращающим моментам. Решение вопроса заключается в том, что при пуске включают в ротор большие сопротивления, а при постоянной работе мотора, наоборот, малые сопротивления.

Приходится снова прибегнуть к контактному кольцу. Мы включаем при пуске в цепь ротора через контактные кольца достаточно большое омическое сопротивление и смещаем тем самым искусственно точку короткого замыкания на круговой диаграмме. Этим путем мы можем легко добиться максимально возможного вращающего момента.

Пусковые сопротивления, встраиваемые в так называемый пусковой реостат, не должны длительно включаться. Сдвинутый с места под действием сильного пускового момента ротор очень быстро достигает таких рабочих точек, в которых имеют место большие вращающие моменты; пусковые сопротивления могут быстро выключаться в ступенчатом порядке; сам ротор, наконец, может быть коротко замкнут при помощи коротко-замыкателя через контактные кольца. Контактные кольца всегда снабжаются приспособлением для короткого замыкания.

Но мы делаем еще один шаг вперед и используем положение до конца тем, что при нормальной длительной работе мотора выключаем совсем контактные кольца, мы не только накоротко их замыкаем, но поднимая даже щетки, тем самым избегаем потерь на трение. В результате у нас получился мотор с контактными кольцами и с приспособлением для короткого замыкания и подъема щеток.

Асинхронный мотор с беличьим колесом начинает свое движение с действительной точки короткого замыкания. В первый момент он забирает из сети полный ток короткого замыкания. Круговая диаграмма

(рис. 125) показывает, что ток короткого замыкания в несколько раз превосходит нормальный ток нагрузки. Этот ток достигнет особенно большого значения тогда, когда сопротивление ротора будет мало. При коротком замыкании приложенное напряжение сети целиком поглощается собственными сопротивлениями обмоток.

При эксплуатации сетей потребителей большие толчки тока всегда бывают неприятны. В виду этого часто большие коротко-замкнутые моторы не допускаются. При частом пуске эти моторы слишком сильно тревожат сеть.

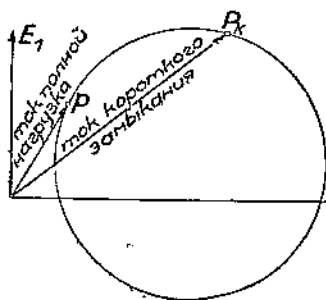


Рис. 125

Пусковой реостат не только увеличивает пусковой момент, но и уменьшает, кроме того, пусковой ток. Этот замечательный факт может быть легко установлен из круговой диаграммы, но он понятен также сам по себе, так как включаемое пусковое сопротивление, при любых обстоятельствах, несомненно улучшает коэффициент мощности в цепи тока ротора.

Таким образом, кажущееся вредным омическое сопротивление в цепи ротора оказывается не только полезным, но даже необходимо.

Мы не можем себе прямо представить, как можно без него работать. Как, например, могло бы без сопротивления получиться скольжение? Сопротивление, правда, расходует энергию, но придает зато мотору надежность.

58. ЗНАЧЕНИЕ ЧИСЛА ПОЛЮСОВ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ.

В теории асинхронной машины нельзя пройти мимо вопроса о числе полюсов. В противоположность синхронной машине, где число полюсов играет второстепенную роль, в асинхронной машине число полюсов сильно отражается на ее работе.

В случае асинхронной машины мы прежде всего должны подобрать число полюсов в соответствии с желательным числом оборотов машины. Число оборотов асинхронного мотора не многим отличается от синхронного числа оборотов. В этом смысле между асинхронными машинами и синхронными большой разницы нет.

Но в асинхронной машине число полюсов сильно отражается на величине ее намагничивающего тока. Ток же холостого хода, который почти идентичен с намагничивающим током, является одним из наиболее важных эксплуатационных факторов асинхронной машины. В виду этого, число полюсов для асинхронной машины имеет совсем другой смысл, чем это было у синхронной машины.

Проследим, каким образом число полюсов влияет на намагничивающий ток. Без больших рассуждений, при помощи только одного искусственного построения, мы получим основные зависимости.

Рис. 126 показывает, как замыкаются четыре магнитных цепи у четырехполюсной машины. Двух силовых линий на пару полюсов достаточно для того, чтобы показать направление частичных потоков. При $p=$

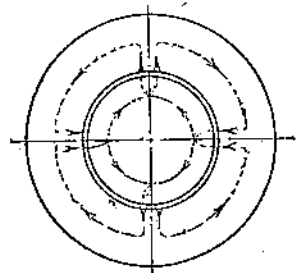


Рис. 126

полюсах мы получили бы p замкнутых силовых линий, а при двух полюсах, следовательно, получим две силовых линии.

Но можно представить себе также, что магнитный поток следует показанному на рис. 127 пути. При этом представлении мы получим всего лишь две силовых линии. Но легко убедиться в том, что каждый полюс вызывает двойное пересечение воздушного зазора магнитным потоком.

Если считать, что на воздушный зазор между статором и ротором приходится все магнитное сопротивление в цепи магнитного потока, то намагничивающий ток должен увеличиваться пропорционально числу полюсов. Воздушный зазор на самом деле содержит большую часть магнитного сопротивления. Намагничивающий ток весьма быстро растет с увеличением числа полюсов; он почти пропорционален последнему. С другой стороны, ток короткого замыкания, как у трансформатора, зависит, главным образом, только от собственных сопротивлений обмоток. Мы можем считать, что разница между четырехполюсным и восьмиполюсным мотором может быть выражена круговыми диаграммами рис. 128.

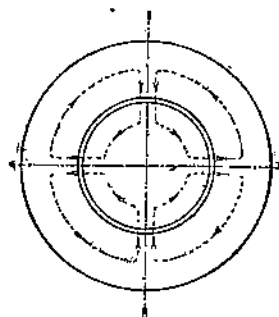


Рис. 127

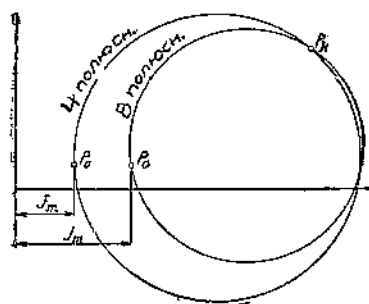


Рис. 128

Мы тотчас же убеждаемся в том, что коэффициент мощности асинхронного мотора падает с увеличением числа полюсов. Вместе с ним падает также коэффициент полезного действия. При увеличении числа полюсов вдвое и при сохранении тех же размеров машины механическая мощность уменьшится больше, чем на половину. Окружная скорость уменьшилась вместе с числом оборотов вдвое, вращающий момент остался приблизительно прежним. Прежними остались, однако и веса меди и железа, а вместе с ними сохранили свое значение и потери, — при условии, что плотность тока и индукция также не изменились.

Четырехполюсный асинхронный мотор работает еще не так хорошо. Наилучшими свойствами обладает двухполюсный мотор. Он, действительно, имеет высокий коэффициент полезного действия и хороший коэффициент мощности. Но и четырехполюсный мотор все-таки достаточно хорош.

Выше 6 полюсов мы идем не охотно. Но, если мы вынуждены это делать, тогда мы должны принять все меры к уменьшению влияния воздушного зазора, что достигается сильным уменьшением его величины при помощи весьма точной обработки.

59. ИЗОБРАЖЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ И СКОЛЬЖЕНИЯ НА КРУГОВОЙ ДИАГРАММЕ.

Круговая диаграмма асинхронного мотора, являющаяся одновременно круговой диаграммой всеобщего и статического трансформатора, была бы не полной, если бы мы не имели возможности изобразить на ней коэффициент полезного действия и скольжение.

Весьма замечательно, что коэффициент полезного действия и скольжение имеют нечто общее. Коэффициент полезного действия выражается

отношением отдаваемой во вторичной цепи полезной мощности к подводимой к статору мощности

$$\eta = 100 \frac{N_2}{N_1} \%.$$

С другой стороны, скольжение показывает, какая часть в процентах подводимой к ротору энергии тратится в нем в виде тепла

$$\sigma = 100 \frac{V_2}{N} \%.$$

В обоих случаях нанесение на диаграмму наталкивается на ту трудность, что рассматриваемые мощности, измеряемые расстоянием от рабочих точек до соответствующих линий мощности, даются в различных масштабах.

Прежде всего сопоставим линию суммарных потерь

$$V = 0$$

линию полезной мощности

$$N_2 = 0$$

и линию суммарной мощности

$$N_1 = 0.$$

Как выше было установлено, все эти прямые пересекаются в одной точке (рис. 129). Если рабочая точка совпадает с линией мощности, то, очевидно, мощность будет равна нулю. Это возможно лишь при том

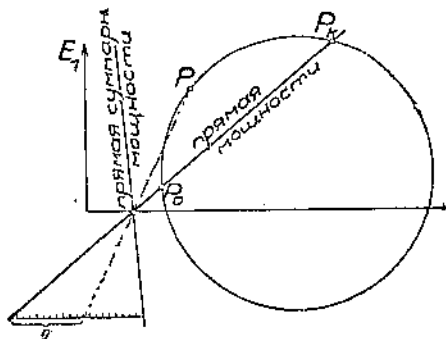


Рис. 129

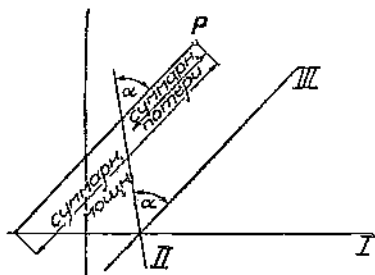


Рис. 130

условию, когда суммарные потери равны суммарной мощности. Тем не менее мы видим, что перпендикулярные расстояния находящейся на линии мощности рабочей точки от линии суммарных потерь и линии суммарной мощности не одинаковы. Это происходит вследствие различия масштабов.

Мы уже упоминали, что расстояния от любой линии мощности можно измерять и под любым углом. Само собой понятно, что один раз выбранный угол нужно сохранить потом для всех прочих рабочих точек. Рис. 129 показывает, что мы получим суммарные потери и суммарную мощность в одном и том же масштабе, если будем измерять расстояния от рабочей точки в направлении, параллельном линии мощности.

Вообще говоря, мы получим две составляющие мощности в одном и том же масштабе, если изображающие их расстояния будем измерять в направлении, параллельном третьей линии составляющей мощности, по отношению к которой обе первые составляющие равны (рис. 130).

Если рабочая точка совпадает с осью x -ов, т.е. с линией суммарной мощности, то, как легко видеть, при этом будут иметь место суммарные

потери и полезная, правда, отрицательная мощность. Суммарные потери и мощность должны быть, очевидно, равны. Полезная мощность отрицательного знака соответствует подводимой со вторичной стороны мощности, в точности покрывающей потери.

Поэтому, если мы захотим получить суммарные потери и полезную мощность в одинаковом масштабе, мы должны измерять расстояния от рабочей точки в направлении, параллельном оси x -ов. Поэтому мы можем параллельно оси x -ов начертить масштаб, содержащий 100 мм, поместив его между продолжением линии суммарных потерь и линии мощности; линия, проведенная из рабочей точки через точку пересечения трех линий мощности, отсекает на масштабе величину коэффициента полезного действия. Каждому миллиметру масштаба соответствует один процент коэффициента полезного действия.

Линия тепловых потерь в роторе

$$V_2 = 0$$

линия вращающихся моментов

$$N = 0$$

и линия мощности

$$N_2 = 0,$$

образуют, согласно рис. 131, пучок линий, подобный рассмотренному выше. Точкой пересечения является точка холостого хода, или, правильнее, рабочая точка, соответствующая синхронизму.

Если рабочая точка попадает на прямую вращающего момента, то тепловые потери в роторе должны оказаться равными полезной мощности, при чем последняя опять таки должна быть отрицательной. Подводимая к ротору механическая мощность как раз покрывает тепловые потери в роторе. Мы получим тепловые потери в роторе и полезную мощность в одном и том же масштабе, если будем измерять пропорциональное им расстояние от рабочих точек круговой диаграммы по направлению, параллельному линии вращающего момента (рис. 131).

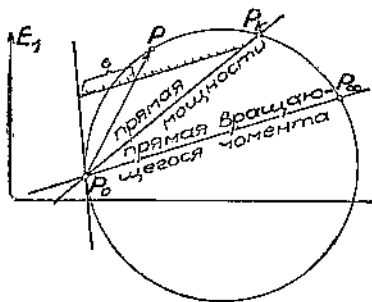


Рис. 131

Снова, как показано на рис. 131, между продолжениями линии полезной мощности и тепловых потерь в роторе, параллельно линии вращающего момента, отложим масштаб для скольжения, содержащий 100 мм. Линия, проведенная из рабочей точки круговой диаграммы через точку холостого хода, отсекает на масштабе величину скольжения. Каждому миллиметру масштаба соответствует один процент скольжения.

60. ОБЗОР КРУГОВОЙ ДИАГРАММЫ.

Доведенная до конца круговая диаграмма асинхронной машины неожиданно дает возможность получить весьма отчетливое представление о всех ее эксплуатационных свойствах. Диаграмма может быть применена для асинхронной машины при работе ее в качестве мотора, тормоза или же генератора.

Начиная с точки холостого хода полезная мощность мотора возрастает до известного предела. После этого, она снова убывает и

превращается в нуль в точке короткого замыкания. Между точкой холостого хода и точкой короткого замыкания над осью x -ов лежит область асинхронного мотора. Последняя ограничена в то же время масштабом скольжения пределами

$$\sigma = 0 \text{ и } \sigma = 100\%.$$

Если асинхронная машина получит механическую нагрузку выше той, которая соответствует короткому замыканию, то машина начинает действовать как тормоз. Для этого случая мы имеем пределы

$$\sigma = 100\% \text{ до } \sigma = \infty.$$

Если же мы пойдем от точки холостого хода в другом направлении, пользуясь отрицательным скольжением, то мы войдем в область работы асинхронного генератора. В отношении скольжения эта область имеет следующие границы

$$\sigma = 0 \text{ и } \sigma = \infty.$$

Все три области работы имеют общие линии мощности вращающего момента и потерь. Одна общая круговая диаграмма относится ко всем этим трем случаям работы асинхронной машины. При изучении последней такая круговая диаграмма является, действительно, необыкновенно ценным орудием. Она имеет совершенно особое значение для понимания принципа действия электрических машин. Давая исчерпывающие описания всеобщего трансформатора, она одновременно описывает и отдельные виды трансформаторов.

Круговая диаграмма полностью пригодна и для статического трансформатора, полезная мощность которого является электрической, а не механической. Правда, скольжение для статического трансформатора будет иметь гораздо меньшее значение: оно будет показывать разве только какую часть полезной мощности составят вторичные тепловые потери.

Трансформатор тока и синхронная машина также имеют, как мы уже видели, свою круговую диаграмму. Они не были бы трансформаторами, если бы не работали по круговой диаграмме. Они имеют свои линии потерь и полезной мощности, совершенно так же, как асинхронный мотор.

Мы, следовательно, можем с полным правом очень широко распространить область применения круговой диаграммы. Тот факт, что круговая диаграмма была разработана при описании принципа действия асинхронного мотора, вполне понятен: асинхронная машина является всеобщим трансформатором, а потому она работает именно по круговой диаграмме.

Круговые диаграммы прочих видов машин могут быть всегда получены при помощи приведенной теории круговой диаграммы. Не стоит решать здесь еще и эту задачу, она настолько проста, что не нуждается в дальнейшем разъяснении.

В теории электрических машин круговая диаграмма играет роль объединяющего звена. Круговая диаграмма охватывает трансформатор, синхронную машину и асинхронную машину; она всегда напоминает о существовании всеобщего трансформатора и дает знать о том, что все машины по существу являются трансформаторами.

Круговая диаграмма обладает неизбежными погрешностями, которые иногда сказываются весьма мало, а иногда делаются неприятными. Причиной получающихся в круговой диаграмме ошибок является непостоянство магнитной проводимости неизбежного в электрических машинах железа.

Ни в одной машине намагничивающий ток нельзя считать строго пропорциональным интенсивности рабочего магнитного потока. Индуктивное сопротивление x_c , находящееся в постоянном ответвлении эквивалентной схемы всеобщего трансформатора, на самом деле представляет собой переменную величину. В этом и заключается слабое место круговой диаграммы.

Этот недостаток сравнительно мало сказывается у трансформаторов напряжения, т.-е. у обыкновенных статических трансформаторов и у асинхронных моторов. И те и другие работают при мало изменяющемся магнитном потоке.

В случае трансформатора тока, а следовательно и синхронной машины, приходится серьезней учесть непостоянные свойства железа. Синхронная машина, правда, вынуждена работать также при мало меняющемся магнитном потоке, так как эксплуатация от нее требует постоянства вторичного напряжения у клемм. Таким образом мы видим, что круговая диаграмма не настолько неточна, как это может показаться с первого взгляда. Правда, в отношении трансформатора тока круговая диаграмма довольно неточна, но в этом случае значение ее ничтожно.

V. Коллекторные машины.

61. ЗНАЧЕНИЕ КОЛЛЕКТОРА.

Совершенно своеобразную отрасль электромашиностроения представляют собой коллекторные машины. Не может быть сомнения в том, что они имеют общее происхождение с машинами, работающими по принципу всеобщего трансформатора. Но коллектор, которым снабжены эти машины, очень сильно отражается на самой их сущности.

Нельзя отрицать, что из всех электрических машин коллекторные машины имеют самое сложное исполнение и требуют наиболее хлопотливого ухода. Как мы увидим позже, коллектор представляет собой весьма остроумный, но зато с трудом поддающийся изучению элемент машины. Тем более замечательным становится тот факт, что электромашиностроение началось именно с коллекторных машин.

Действительно, тогда это было целесообразно, так как электротехника вынуждена была начать с постоянного тока. В те времена не имело никакого смысла идти на неудобства переменного тока, не имея возможности в то же время использовать преимущества последнего. Лишь передача энергии на далекое расстояние способствовала внедрению переменного тока.

Итак, пришлось начать с постоянного тока, и нужно было для этой цели построить электрические машины. Конечно, предпочли бы иметь машины постоянного тока без коллектора. Но это оказалось невозможным. Униполярная машина, как мы увидим позже, для практических целей оказалась непригодной.

Таким образом, одновременно с машиной постоянного тока в электромашиностроение весьма рано внедрился и коллектор. Последний, давая возможность построить машину для нужного постоянного напряжения, на первых порах доставлял много хлопот как конструктору, так и эксплуатационному инженеру.

Мотор постоянного тока обладает несомненными преимуществами, но эти достоинства обесцениваются присутствием коллектора, поскольку они получают цену усложнения коммутации тока и введения в эксплуатацию коллектора. Вдохнули свободно лишь тогда, когда оказалось возможным применение незыскательного асинхронного мотора. С появлением трехфазных моторов едва развивавшиеся коллекторные машины стали приходить в упадок. В то время коллекторная машина и машина постоянного тока были понятиями идентичными, и она поэтому разделяла участь сходящего все более на-нет постоянного тока.

Между тем теория имела достаточно времени, чтобы совершенно точно изучить все трудности, связанные с наличием коллектора. Она нашла

много выходов, в том числе много хороших. Может показаться даже нелепым, что в тот момент, когда, казалось, коллектор должен был стать победителем, он начал выходить из употребления.

Но дело обстоит не совсем так. Привод при помощи трехфазного тока развивался очень быстро, труднейшие связанные с ним проблемы были решены, но все упорнее поднимаются два вопроса, не находя сколько-нибудь удовлетворительного разрешения.

Как улучшить коэффициент мощности асинхронного мотора и как добиться регулирования числа оборотов без потерь?

Здесь снова всплыл коллектор. Он стал развиваться и показал, что он уместен не только там, где требуется получить постоянный ток, но, что он в состоянии создать совершенно своеобразный тип электрической машины.

Кроме старых коллекторных машин постоянного тока, получились еще коллекторные машины однофазного и трехфазного тока. Стали применяться весьма остроумные комбинации. Компенсация сдвига фаз и регулировка числа оборотов стали возможными ценой введения коллектора.

Но тем не менее, коллектор не перестал быть неприятным элементом электрической машины. Таким же он остался и по сие время. При переменном токе обнаружались еще другие трудности, не имевшие места при постоянном токе, и преодолеть которые целиком не представляется возможным.

В настоящее время мы в состоянии построить хорошие коллектора для однофазного и трехфазного тока, в то время как для постоянного тока мы научились уже давно строить безколлекторные коллектора. Мы не можем теперь больше работать без коллектора. Имеются случаи, когда только один коллектор в состоянии дать правильное решение. Таким образом электромашиностроение не только начало с коллектора, но и пришло к нему в заключение. Построение коллекторных моторов еще продолжает развиваться, но все преимущества, связанные с коллектором, кажутся уже исчерпанными, недостатки же его уже давно известны.

62. УНИПОЛЯРНАЯ МАШИНА.

Проблема получения постоянного тока при помощи машин не может быть разрешена просто. Во всех изученных до сих пор машинах мы всегда имели дело с переменными напряжениями на проводнике или на витке. Уже в главе 18 мы установили, что наведение постоянных напряжений невозможно.

Но все же есть выход. Напряжение на проводнике

$$E_{st} = B \cdot v \cdot l \cdot 10^{-8} \text{ вольт}$$

остаётся постоянным при равномерном движении его и равномерном распределении плотности силовых линий магнитного потока. Однако, магнитный поток, входящий в движущийся якорь, должен из него снова выйти. Следовательно, казалось бы, что по окружности якоря должна иметь место перемена знака индукции.

Но это не обязательно. Вступающий в цилиндр якоря по радиальному направлению магнитный поток может выступить, как показано на рис. 132, в направлении аксиальном. Становится вполне возможным сократить величину и знак индукции вдоль всей окружности якоря. Следовательно можно осуществить получение постоянного напряжения машинным способом.

Рис. 132 представляет в упрощенном виде идею униполярной машины. Она таит в себе возможность простого выполнения и неприхотливой эксплуатации. Контактные кольца, осуществляющие всегда соединение между движущимися обмотками и неподвижными сопротивлениями потребителя являются вполне надежной и хорошо работающей деталью, избежать применения которой не приходится.

Но эта простая униполярная машина имеет один большой и неустраняемый недостаток. Она может развить напряжение, равное только напряжению одного проводника. Вдоль окружности якоря можно уложить много проводников, но их можно включить только параллельно, соединяя их концы общим контактным кольцом. Последовательное включение проводников невозможно, в виду чего нельзя поднять напряжение машины выше одинарного напряжения проводника.

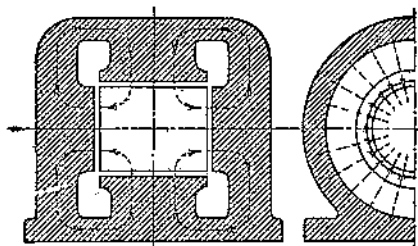


Рис. 132

Последовательное включение проводников возможно лишь в том случае, когда провод, соединяющий конец одного проводника с началом другого, может быть вынесен за пределы действия рабочего магнитного потока. В главе 21 мы уже встретились с этим вопросом. Мы нашли выход в том, что соединяли те проводники, начала и концы которых находятся

на разных концах якоря. Сами соединительные провода располагались на торцевых поверхностях якорного цилиндра.

В случае униполярной машины этот выход неприемлем. Все напряжения на проводнике имеют одинаковое направление. Для осуществления последовательного включения пришлось бы вести соединительные провода вдоль всего цилиндра якоря. Но при этом, согласно рис. 47, в соединительном проводе также будут наводиться напряжения, что сведет на-нет значение последовательного соединения.

К сожалению, от последовательного соединения проводников в случае униполярной машины приходится отказаться. Напряжение на проводнике почти во всех случаях даже при низком рабочем напряжении, слишком мало. Его можно довести самое большее до 100 вольт, для чего потребуются большие размеры машины и значительные окружные скорости якоря.

Итак, униполярная машина ничего не дает. Она может быть применена разве только для электрохимических целей. Как рабочая машина постоянного тока она не годится, представляя собой в теории электрических машин лишь интересный опыт.

Тем не менее, казалось бы, что эта машина дает единственно возможный способ получения постоянных напряжений. Ведь напряжения в проводнике, эти элементы суммарного напряжения машины, никаким другим путем нельзя удерживать на постоянной высоте, как только при помощи униполярного магнитного потока; не допуская при этом изменений окружной скорости якоря.

На самом же деле нам приходится исходить из того факта, что напряжения в проводнике должны быть переменными. В противном случае невозможно получение сколько-нибудь высоких напряжений на клеммах машины. Но то обстоятельство, что из мгновенных напряжений в проводнике составляются в обмотке или на клеммах машины постоянные напряжения, является большой неожиданностью и в этом состоит секрет работы коллектора.

Но это не единственный его секрет. Мы позже увидим, что подобное применение коллектора является лишь частным случаем. Во всяком случае, он при этом разрешает настолько существенную задачу, что, несмотря на доставляемые им хлопоты при эксплуатации, он тем не менее заслуживает полного внимания. Он вносит собой в электромашиностроение настолько новую и большую идею, что связанные с коллектором трудности отходят на второй план.

63. ТЕКУЧИЕ ОБМОТКИ.

Мы снова должны вернуться к рассмотренной нами в главе 2 упрощенной модели электрической машины, из которой получилась обыкновенная синхронная машина. Эта модель представляет собой остов с выступающими магнитами, полюсные наконечники которых охватывают вращающийся цилиндрический якорь; на последнем имеются пазы, в которых заложены проводники.

В любом из включенных последовательно проводников возбуждаемый магнитами постоянный поток наводит переменные напряжения. Попытаемся превратить эти переменные напряжения в постоянные. Напряжение в проводе, а, следовательно и суммарное напряжение всех включенных последовательно проводов все время изменяется. Мгновенное значение наведенного напряжения зависит исключительно от положения движущегося проводника или движущейся группы проводников относительно неподвижного корпуса магнитов. Прежнее значение напряжения повторяется, когда проводники снова занимают свое прежнее относительное положение.

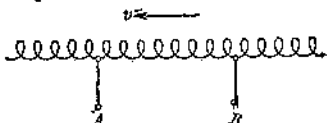


Рис. 133

Этот простой факт безусловно не дает ничего нового. Но он имеет тем не менее большое значение. Из этого факта мы делаем тот вывод, что напряжение в проводе или в группе проводов может быть только переменным; с другой стороны, напряжение последовательного ряда проводников, непрерывно движущихся, но занимающих все время одно и то же заданное положение, неизменно и может быть названо постоянным. В результате мы получаем текучую обмотку.

Неизменные обмотки состоят из некоторого количества включенных последовательно проводников, все время остающихся в обмотке. Начало и конец неизменной обмотки передвигаются вместе с ее проводниками. Текучие обмотки состоят из заданного постоянного числа соединенных последовательно проводников, но входящих и выходящих из обмотки. Начало и конец текучей обмотки остаются на месте, в то время как сами проводники передвигаются.

Ряд витков между зажимами А и В на рис. 133 представляет собой неизменную обмотку. Зажимы передвигаются вместе с группой витков. В текучей обмотке рис. 134 содержится такое же число витков; играющая здесь роль зажимов щетки скользят по изолированным друг от друга контактам, соединенным с витками. Щетки и обмотка остаются неподвижными, витки же вступают с одной стороны обмотки и одновременно выходят из другого конца ее. Число витков в обмотке остается постоянным. На рис. 134 показана модель коллектора. Его наиболее существенными деталями являются: изолированные между собой, играющие роль контактов, коллекторные пластины, соединенные с каждым витком или проводником обмотки и из скользящих по этим пластинам щеток, играющих роль зажимов текучей обмотки.

Существенен еще один момент. Витки или проводники должны непрерывно входить и выходить из текущей обмотки, оставаясь при этом все время в последовательном соединении. Это возможно лишь в том случае, когда последовательный ряд витков будет бесконечным.

Такое требование выполнить легче чем кажется. В коллекторе пластины соединяются в кольцо, разделенное, как показано на рис. 135, на сегменты; соединенная с ними обмотка якоря замкнута сама на себя. Вся обмотка якоря не имеет ни конца ни начала; щетки коллектора отсекают на ней произвольное число витков, которое мы и считаем текущей обмоткой.

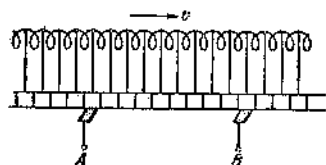


Рис. 134

Представляется не лишним, произвести здесь сравнение между контактным кольцом и коллектором. Контактные кольца осуществляют соединение с точками обмотки, передвигающимися вместе с неизменной обмоткой. На контактных кольцах можно иметь только напряжения от неизменных обмоток, т.е. переменные напряжения. Щетки коллектора имеют контакт с теми точками обмотки, которые находятся относительно щеток в покое. На щетках коллектора получаются напряжения от текущих обмоток, следовательно, они могут быть постоянными. В том, что эти напряжения не должны быть обязательно постоянными, а только могут ими быть, мы убедимся впоследствии.

Попутно вскроем слабые места коллектора. Проводники из одной текущей обмотки все время поступают под щетки и тотчас же переходят в другую текущую обмотку. Каждая замкнутая на себя цепь проводников распределяется, по крайней мере, на две текущие обмотки, что соответствует случаю, когда на коллектор наложены две щетки. В пересекаемом проводнике ток в весьма короткое время должен измениться как по величине, так и по напряжению, так как он должен перейти из одной текущей обмотки в другую. Подобное превращение тока или коммутация представляет собой наиболее сложную проблему машины постоянного тока. Этим вопросом мы, безусловно, должны будем заняться.

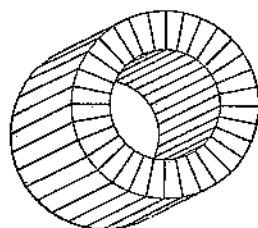


Рис. 135

64. ЗАМКНУТЫЕ ОБМОТКИ ЯКОРЯ.

Замкнутые на себя обмотки якоря коллекторной машины могут иметь различные исполнения. Необходимо изучить по крайней мере основные типы замкнутых обмоток якоря. Полная теория обмоток не может быть включена в настоящее изложение, в котором мы задались целью лишь дать описание принципов действия электрических машин. Схема замкнутых обмоток станет особенно понятной, если мы дополним ее векторными диаграммами, уже оказавшими нам в свое время большую услугу. Будем считать поэтому в дальнейшем распределение магнитного потока по окружности якоря синусоидальным; в виду этого напряжения на проводниках будут также синусоидальными, что даст нам право изображать их в виде векторов.

В главе 21 уже был указан основной принцип исполнения обмоток. Нужно включать последовательно все проводники, напряжения которых направлены друг другу навстречу полностью, или же почти полностью.

Замкнутая обмотка якоря должна также с каждым шагом менять свою полярность.

В качестве примера возьмем двухполюсную обмотку на 24 проводника и нанесем ее на развернутой поверхности цилиндра якоря (рис. 136), разделив ее пополам и поместив каждую половину под своим полюсом. Наводимые под одним и тем же полюсом напряжения направлены, очевидно, одинаково; под разными же полюсами наводятся напряжения противоположного знака.

Начнем с проводника 1, соединим его с проводником 14 и возвращаемся к проводнику 3 обратно; получаем, таким образом, следующую цепь

1—14—3—16—5—10—7—20—9—22—11—24—13—2—15—4—
—17—6—19—8—21—10—23—12—1.

Опыт показывает, что начало 1—13—3 не приводит к цели; неудач-

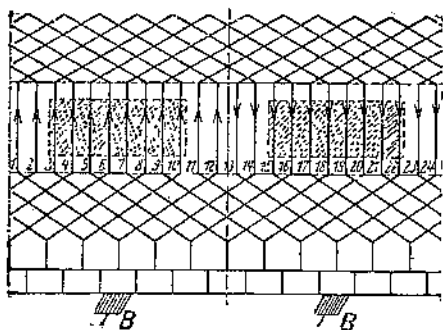


Рис. 136

ной является также попытка 1—14—2 и тому подобное. Теория учит, что каждый шаг обмотки должен охватить нечетное число зубцов, в противном случае замкнутая обмотка не обойдет всех проводников.

В этом состоит единственная трудность описанной, так называемой петлевой обмотки. Названием

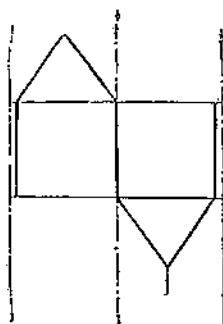


Рис. 137

своим она обязана петлям (например: 1—14—3), из которых она, согласно рис. 136, состоит.

При выборе общего числа проводников мы связаны только тем, что оно должно быть обязательно кратно двум.

Можно получить обмотку якоря еще другим способом, если в многополюсной машине от второго полюса не возвращаться снова к первому полюсу, как мы это делали выше, а идти дальше — к третьему полюсу (рис. 137). Элемент обмотки в этом случае будет иметь вид волны, откуда получила свое название волновая обмотка.

Волновая четырехполюсная обмотка, содержащая 30 проводников, имеет шаг, охватывающий нечетное число зубцов; в результате получается следующая последовательность, включающая все 30 проводников

1—8—15—22—29—	—30—7—14—21
—6—13—20—27	—28—5—12—19
—4—11—18—25	—26—3—10—17
—2—9—16—23	—24—1

Попытка получить четырехполюсную волновую обмотку из 28 проводников

1—8—15—22—1

оказывается неудачной, так как обмотка замыкается уже через четыре шага. Число проводников, очевидно, не должно быть кратко числу полюсов.

Разница между петлевой и волновой обмоткой довольно существенна. Она обнаруживается проще всего, если с вышеописанной четырехполюсной волновой обмоткой сопоставить четырехполюсную петлевую обмотку, состоящую также из 30 проводников. Последняя составила бы следующую последовательность проводников

1 — 8 — 3 — 10 — 5 — 12 — 7 — 14 — 9 — 16 — 11 — 18 — 13 — 20 — 15 — 22 —
— 17 — 24 — 19 — 26 — 21 — 28 — 23 — 30 — 25 — 2 — 27 — 4 — 29 — 6 — 1.

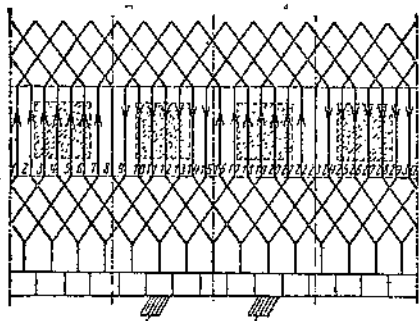


Рис. 138

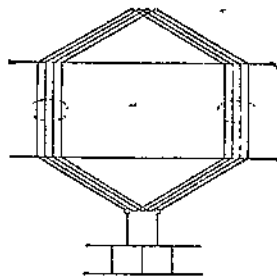


Рис. 139

Между двумя соседними проводниками всегда получается электрический угол

$$\alpha = \frac{360}{z} \cdot \frac{p}{2},$$

где z — число проводников, а p — число полюсов. Рис. 138 показывает, что напряжения в проводниках 1 и 16 имеют одинаковую фазу. В этом мы

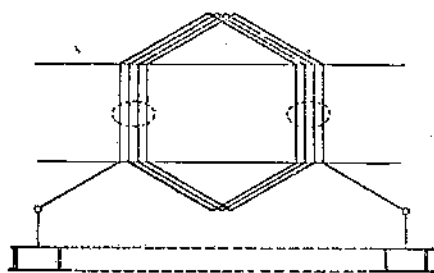


Рис. 140

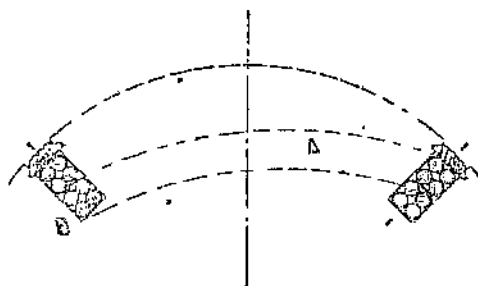


Рис. 141

убеждаемся также путем подсчета угла, составляемого этими проводниками

$$15 \cdot \frac{360}{30} \cdot \frac{4}{2} = 360^\circ.$$

Петлевая обмотка на протяжении 9 шагов передвигается на 360 электрических градусов, в то время, как при волновой обмотке, для образования такого же угла нужно сделать 15 шагов. Петлевая обмотка имеет поэтому больше точек равного потенциала, чем волновая обмотка. При петлевой обмотке получается также большее число параллельных переменных обмоток, чем в случае волновой обмотки.

Обе обмотки — петлевая и волновая — могут быть выполнены в виде катушечных обмоток. Каждая петля, как показано на рис. 139, может

иметь большое число витков; у каждой катушки имеется, как говорят, две стороны, каждая из которых содержит множество проводников; для внешней цепи каждая сторона катушки играет роль проводника.

Волновая обмотка также может состоять из катушек, при чем и в этом случае сторону катушки можно считать отдельным проводником (рис. 140). По внешнему виду петлевая обмотка отличается от волновой обмотки соединениями катушек между собой. Каждая катушка имеет, за редким исключением, только две коллекторных пластины.

В настоящее время замкнутые обмотки якоря выполняются исключительно в два слоя. В каждый паз положено, согласно рис. 141, одна над другой две стороны катушек; требование иметь всегда внутри шага обмотки нечетное число зубцов, заставляет одну сторону катушки в первом пазу помещать наверху, а в следующем пазу, вторую сторону катушки размещать внизу (рис. 141). Расположение катушек обмотки на якоре напоминает расположение плиток на черепичной крыше.

65. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ОКРУЖНОСТЬ ЗАМКНУТОЙ ОБМОТКИ ЯКОРЯ.

Весьма наглядное представление о работе замкнутой обмотки якоря дает векторная диаграмма напряжений на проводнике. Вследствие равномерного распределения обмотки по окружности якоря, последовательность напряжений проводников или катушек образует, согласно рис. 142, правильный векторный многоугольник; последний должен замкнуться, так как сама обмотка также замкнута.

Из описания различных видов обмоток предыдущей главы можно заключить, что многоугольник напряжений замыкается, большей частью, лишь после нескольких обходов. Так, например, петлевая обмотка столько раз обходит многоугольник векторов, сколько пар полюсов имеет машина; волновая обмотка делает меньшее количество обходов.

Имея в виду большое число проводников, мы заменяем, обыкновенно многоугольник векторов простой окружностью, так называемой потенциальной окружностью. Каждой точке потенциальной окружности соответствует, следовательно, одна точка замкнутой на себе обмотки, или же несколько точек — в том случае, когда обмотка совершает несколько круговых обходов. Хорда потенциальной окружности дает напряжение между двумя определенными точками на обмотке; напряжение это, конечно, является переменным.

Наибольшее возможное напряжение в обмотке соответствует диаметру потенциальной окружности; оно имеет место между двумя точками обмотки, сдвинутыми между собой на угол в 180 электрических градусов. Если мы эти точки присоединим к двум контактным кольцам, то мы получим возможность снимать максимальное переменное напряжение якоря. Щетки коллектора, сдвинутые по отношению друг к другу на 180 электрических градусов фиксируют мгновенное значение этого максимального переменного напряжения. Какое именно мгновенное значение они фиксируют, зависит от положения щеток относительно остова магнитов. Естественным, что мы будем стремиться всегда получить в виде постоянного

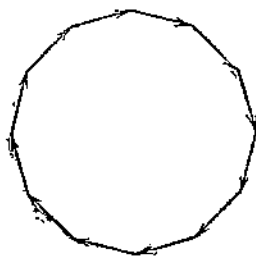


Рис. 142

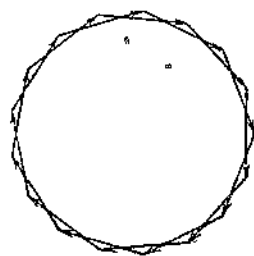


Рис. 143

именно максимальное мгновенное значение переменного напряжения. В виду этого, необходимо тщательно подбирать положение щеток.

В двухполюсной машине 180 электрических градусов соответствуют 180 же геометрических градусов. Обе щетки поэтому располагаются на концах диаметра коллектора. Они разделяют обмотку якоря на две равные части. Щетки должны быть установлены таким образом, чтобы знак напряжения в обеих переменных обмотках не менялся. Рис. 144 показывает, что щетки всегда должны быть соединены с проводниками, находящимися как раз между полюсами. Короче говоря, наибольшее постоянное напряжение при помощи щеток можно получить в нейтральной зоне.

Четырехполюсный коллектор нуждается в четырех щетках в том случае, когда он обслуживает петлевую обмотку. Две из них имеют равный потенциал, а потому могут быть соединены между собой, как показано на рис. 144. Об этом говорит также приведенная выше схема. Все четыре

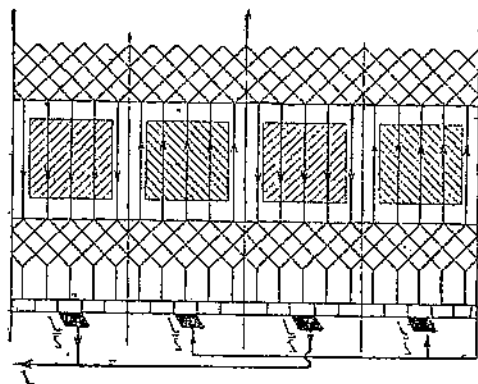


Рис. 144

щеток для получения наибольшего напряжения на проводнике должны быть помещены в нейтральной зоне.

Волновая обмотка требует меньшее количество щеток; в своей простейшей форме эта обмотка нуждается только в двух щетках, в то время, как число щеток многополюсной петлевой обмотки равно числу ее полюсов. Волновая обмотка представляет собой ярко выраженную последовательную обмотку, а петлевая обмотка — параллельную.

С одного и того же якоря можно снимать одновременно постоянное и переменное напряжение. Для этой цели нужно только одновременно

иметь контактные кольца и коллектор. Учитывая большое значение машины с двойным током, исследуем потенциальную диаграмму для этого случая. Напряжение постоянного тока E_{g1} получающееся на помещенных в нейтральной зоне щетках коллектора может быть представлено, как нам известно, диаметром потенциальной окружности. Это максимально возможное постоянное напряжение по величине равно амплитудному значению максимального возможного переменного напряжения. Поэтому, если мы будем одновременно снимать с якоря при помощи двух контактных колец также и максимальное переменное напряжение E_1 , то мы получим

$$E_{g1} = \sqrt{2} E_1.$$

При помощи трех контактных колец, открывающих доступ к трем точкам на обмотке якоря, сдвинутых между собой на 120 электрических градусов, мы можем, очевидно, получить трехфазный треугольник напряжений. Междупазовое напряжение E_3 этого треугольника напряжений, согласно рис. 145, равно

$$E_3 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{E_{g1}}{2}.$$

Коэффициент — корень квадратный из двух — учитывает соотношение между эффективным и амплитудным значением переменного напряжения.

Три точки на обмотке, сдвинутые между собой на 120 электрических градусов, делят всякую замкнутую обмотку якоря на три постоянных сдвинутых между собой в пространстве на 120 электрических градусов обмотки. Таким образом, мы видим, что замкнутая обмотка может быть применена как трехфазная; действительно, ротор асинхронных моторов очень часто снабжается замкнутой обмоткой, присоединяющейся к трем контактными кольцам. Разумеется, что фазные обмотки всякой замкнутой обмотки соединяются в треугольник.

Замкнутая обмотка якоря, примененная в качестве трехфазной обмотки, имеет некоторую особенность, на которую следует обратить внимание; последняя является лишь следствием двухслойного расположения сторон катушек.

При обыкновенной трехфазной обмотке можно использовать для одной стороны фазной обмотки лишь угол в 60 электрических градусов, так как для другой стороны обмотки на окружности якоря также требуется занять 60 электрических градусов. В случае же замкнутой трехфазной обмотки одна сторона обмотки помещается наверху, а вторая сторона — внизу, как показано на рис. 146, в этом случае приходится применить 120 электрических градусов.

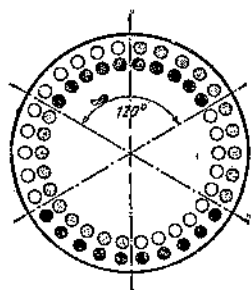


Рис. 146

Из главы 21 нам уже известно, что такие большие углы обмоток нежелательны. Коэффициент замкнутой трехфазной обмотки не получается таким высоким, как у обыкновенной трехфазной обмотки. В этом заключается единственный недостаток замкнутой обмотки. Она строится лишь для низких напряжений, так как в этом случае изолирование полюсных соединений не представляет затруднений.

В роторе асинхронного мотора, по понятным соображениям, выбирает напряжение достаточно низким. Поэтому замкнутая трехфазная обмотка подходит для роторов асинхронных моторов.

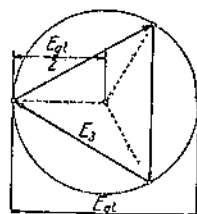


Рис. 145

66. ВОЗБУЖДЕНИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

Коллекторная машина постоянного тока (мы будем ее называть просто машиной постоянного тока) при помощи коллектора создает постоянное напряжение, но для этого машине требуется постоянный магнитный поток, который из магнитов проходил бы через воздушный зазор в якорь и пересекал бы проводники.

Необходимо иметь, следовательно, особую обмотку возбуждения, которая помещается, как и в случае синхронной машины, на полюсах. Разумеется, машина нуждается в постоянном токе возбуждения, питающем витки обмотки возбуждения.

Для всех рассмотренных нами до сего времени машин необходим намагничивающий ток. Как трансформатор, так и асинхронный мотор без намагничивающего тока действовать не могут. Мы получаем его из сети, к которой приключены эти машины. Сеть питается синхронным генератором, который в свою очередь нуждается в намагничивающем токе, являющемся, как мы знаем, током постоянным. Этот намагничивающий ток синхронный генератор получает от возбuditеля, представляющего собой машину постоянного тока. Но теперь мы видим, что для машины

постоянного тока также необходим постоянный ток возбуждения, без которого она также действовать не может.

Всегда неприятный для нас намагничивающий ток является жизненно необходимым для всякой электрической машины. Мы должны в результате черпать нужный нам намагничивающий ток, очевидно, из машины постоянного тока.

Великой, правда, вынужденной идеей является заставить машину постоянного тока возбуждать самое себя. Разумеется, что эта идея дала начало электромашиностроению. В настоящее же время, не задумываясь об этом, на каждом шагу применяют эту мысль.

Согласно рис. 147, мы, просто присоединяя обмотку возбуждения к зажимам, или к щеткам якоря машины постоянного тока, находимся в полной уверенности, что во время работы машины при полном напряжении на ее зажимах в обмотке магнитов будет протекать ток возбуждения. Но что будет происходить при пуске машины? Ведь напряжение якоря возникает лишь тогда, когда проводники начинают пересекать силовой поток, что может, конечно, иметь место лишь при наличии последнего.

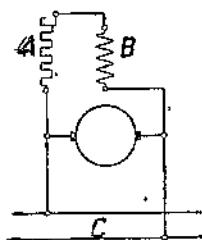


Рис. 147

Не находимся ли мы в заколдованном кругу, из которого нет выхода? На это следует ответить отрицательно. Дело в том, что неподвижная машина постоянного тока всегда имеет в своем железе некоторый остаточный магнетизм. Последний не должен быть даже значительным. Если имеется лишь одна силовая линия на миллион необходимых впоследствии при работе машины линий, то этого достаточно, чтобы машина пошла. В первый момент проводники будут пересекать эту единственную силовую линию, в результате чего появится весьма малое напряжение. Появившееся напряжение якоря пошлет в обмотку возбуждения малый ток, чем будет вызвано усиление магнитного потока; последний начнет состоять из двух линий, затем из трех и так далее, пока он не приобретет полного своего значения.

В. Сименс назвал эту идею динамо-электрическим принципом. Она является основной идеей и на практике всегда оправдывается. Миллионы электрических машин постоянного тока работают с самовозбуждением, при чем за их работу не приходится опасаться. Все же одна опасность угрожает самовозбуждению машин постоянного тока. Остаточный магнетизм, этот источник жизни машины, при неумелом обращении может оказаться бездействующим. Он наводит совершенно надежно первое слабое напряжение якоря; но если это первоначальное напряжение вызывает намагничивающий ток обратного направления, ослабляющий остаточный магнетизм, то при этом весьма быстро наступает окончательное размагничивание железа машины. В этом случае машина оказывается действительно безжизненной; она не в состоянии тогда самостоятельно начать работать и создавать какое бы то ни было напряжение. Описанное явление имеет место довольно часто в результате неправильного включения.

Для оживления таких замерших машин есть только одно средство. В этом случае нужно применить, так сказать „искусственное дыхание“. Необходимо прибегнуть к постороннему источнику постоянного тока, чтобы последний вызвал прохождение хотя бы малого тока возбуждения, а, следовательно, появление магнитного потока.

Подобные неудачи время от времени напоминают о фактах, над которыми сейчас мало задумываются, а именно, что от самовозбуждения машины постоянного тока в конце концов зависит работа грандиознейших

электрических установок, что намагничивающий ток, несмотря на свою нежелательность, является жизненно необходимым для техники сильных токов. Явление самовозбуждения учит нас, что железо является подходящим строительным материалом в электромашиностроении не только благодаря своей большой проводимости, но и благодаря своему свойству задерживать часть магнитного потока после прекращения действия возбуждения. Железо является поэтому незаменимым строительным материалом. Без остаточного магнетизма электромашиностроение оказалось бы беспомощным.

67. НАПРЯЖЕНИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

Магнитный поток машины постоянного тока, возбужденный ею же самой, является, как и в случае синхронной машины, постоянным; но у машины постоянного тока плотность магнитного потока не должна распределяться вдоль окружности якоря обязательно синусоидально.

Проводники обмотки якоря, в самом простом случае, разделенные щетками коллектора на две равные текущие обмотки, всегда находятся под одним и тем же полюсом. Но нужно подчеркнуть, что проводники, размещенные в верхнем слое, лежат под одним полюсом, а проводники, находящиеся в нижнем слое, находятся под другим полюсом. Обе текущие обмотки отличаются, следовательно, между собой тем, что их сверху лежащие проводники имеют различно направленные напряжения, так как эти проводники находятся под разными полюсами. Конечно, то же самое относится и к нижним проводникам обмоток.

Представляется полезным начертить схему обмотки якоря постоянного тока с обозначением различного положения проводников в пазу. Снова возьмем двухполюсную петлевую обмотку, состоящую из 44 проводников, но начертим только сверху лежащие проводники 1—12; под ними мысленно представим себе невидимые проводники 1'—12'. Соединения верхних проводников, кроме того, показаны сплошными линиями; соединения же нижних проводников обозначены пунктиром.

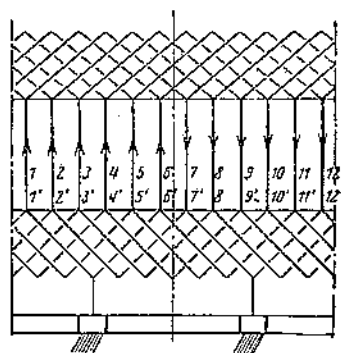


Рис. 148

Мы получим теперь следующую последовательность проводников

— 7¹ — 2 — 8¹ — 3 — 9¹ — 4 — 10 — 5 — 11¹ — 6 — 12¹ — 7 — 1¹ — 8 — 2¹ — 9 —
— 3¹ — 10 — 4¹ — 11 — 5¹ — 12 — 6¹ — 1.

Щетки помещаются у проводников 1 и 7. Между обеими щетками находится, следовательно, верхние проводники 1—7.

Рис. 148 весьма отчетливо показывает, что напряжение на щетках является суммой напряжений на проводниках; эти напряжения направлены одинаково, так как они наведены на промежутке одного и того же полюсного деления. Любой из этих проводников находится в магнитном потоке плотности B_x , а, следовательно, на нем образуется напряжение

$$E = B_x \cdot v \cdot l \cdot 10^{-8},$$

где l — длина проводника в сантиметрах, а v — скорость в секундо-

сантиметрах. Суммарное напряжение текущей обмотки является постоянной суммой отдельных напряжений на проводнике

$$E = \sum_1^{z/2} B_z \cdot v \cdot l \cdot 10^{-8}.$$

Эту сумму надо распространить на половину общего числа проводников якоря $\frac{z}{2}$. Вообще говоря, машина имеет p полюсов и, смотря по роду обмотки, состоит из a параллельных текущих обмоток в якоре, значит, в этом случае, мы должны суммировать напряжения на $\frac{z}{a}$ проводниках. Далее, если магнитный поток одного полюса будет иметь Φ силовых линий, а диаметр якоря будет равен D см, то при n оборотах в минуту, получим

$$v = \frac{D \pi n}{60}.$$

Кроме того, заметим, что на каждый полюс приходится следующая часть общей наружной поверхности якоря

$$\frac{D \pi l}{p}.$$

В том случае, когда проводники расположены равномерно по окружности якоря, при суммировании напряжений на проводнике можно брать среднюю плотность силовых линий B_m , не принимая во внимание распределения магнитного потока.

Мы можем, следовательно, написать

$$E = \frac{z}{a} \cdot B_m \cdot v \cdot l \cdot 10^{-8},$$

или же

$$E = \frac{z}{a} \cdot B_m \cdot \frac{D \pi n}{60} \cdot l \cdot \frac{p}{p} \cdot 10^{-8}.$$

Но

$$\frac{D \pi l}{p} \cdot B_m = \Phi,$$

поэтому напряжение на щетках окажется равным

$$E = \frac{p \cdot n}{60} \cdot \Phi \cdot \frac{z}{a} \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \dots \dots \dots (23)$$

Независимость величины напряжения от формы кривой магнитного потока является не единственным выводом из расчета величины напряжения машины постоянного тока. Уравнение (23) обращает наше внимание, кроме того, на то обстоятельство, что процесс образования напряжений напоминает о свойствах всеобщего трансформатора.

Магнитный поток по отношению к железу якоря является переменным, как то было уже показано в главе 2. Как легко убедиться, периодичность в якоре будет равна

$$f = \frac{p \cdot n}{120}.$$

Напряжение машины постоянного тока может быть выражено в следующем виде

$$E = 2 \cdot f \cdot \Phi \cdot \frac{z}{a} \cdot 10^{-8} \dots \dots \dots (24)$$

С подобным выражением мы уже встречались при рассмотрении трансформатора, синхронной и, конечно, асинхронной машины. Машина постоянного тока является, следовательно, только механизированным трансформатором, с текущей вторичной обмоткой. Две особенности отличают исполнение машины постоянного тока от исполнения синхронной машины, получающей также возбуждение от постоянного тока. Вторичная обмотка машины постоянного тока изменяется („течет“), а вторичная обмотка синхронной машины неизменна. Кроме того, машина постоянного тока имеет, обыкновенно, наружные полюсы, в то время как синхронная машина представляет собой тип машины с внутренними полюсами.

Но различие в способе исполнения несущественно. Несущественно также и то обстоятельство, что у машины постоянного тока магнитный поток не должен быть синусоидальным, так как машина постоянного тока может работать и при синусоидальном потоке. Характерным для машины постоянного тока является, таким образом, только присутствие коллектора. Следовательно, машина постоянного тока может быть превращена в синхронную добавлением контактных колец, дающих возможность присоединить постоянные обмотки якоря. В этом случае, очевидно, необходимо синусоидальное распределение магнитного потока. Машина может в одно и то же время вырабатывать постоянный и однофазный или трехфазный ток. В расчете главы 65 показана зависимость между напряжением постоянного и переменного тока у машины, работающей одновременно на постоянном и переменном токе.

68. ПОЛОЖЕНИЕ ЩЕТОК И ВЕЛИЧИНА НАПРЯЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

Щетки разделяют обмотку якоря на две равные текущие обмотки, напряжения которых равны, но, в замкнутой цепи якоря, согласно рис. 149, напряжения направлены друг другу навстречу. Суммарное напряжение обмотки якоря всегда равно нулю, что вытекает из самой сущности замкнутых обмоток.

Относительно щеток напряжения отдельных текущих обмоток направлены одинаково. Эти обмотки образуют параллельные ветви токов; следовательно, согласно рис. 149, суммарный ток обтекает якорь машины, разветвляясь. Последний не может содержать меньше двух параллельных цепей.

Если мы будем обходить по окружности якоря последовательно все проводники, то мы обнаружим, что на

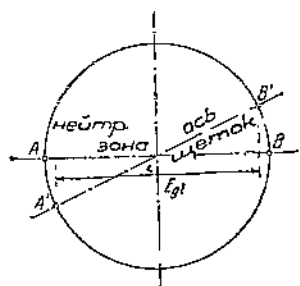


Рис. 150

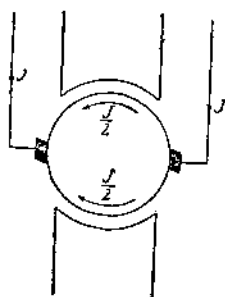


Рис. 149

щетках всегда происходит перемена направления тока. Вместе с переменной направленности тока меняется и направление магнитного потока. В виду этого механическое усилие, которое действует на проводники якоря, сохраняет свое направление по всей окружности якоря, в результате чего получается постоянный вращающий момент. Если сдвинуть щетки из нейтральной зоны, то в текущую частичную обмотку начнут входить некоторые проводники, находящиеся под разными полюсами. Потенциальная окружность (рис. 150) показывает, что постоянное напряжение уменьшилось; оно больше не соответствует диаметру AB , а как всякое моментное значение, равно только проекции диаметра $A'B'$ на AB , представляющей направление

линии времен векторной диаграммы. На рис. 151 показано, что проводники, по которым протекает ток одного направления, находятся под разными полюсами, результатом чего является уменьшение вращающего момента. Очевидно, что он уменьшится ровно настолько, насколько уменьшилось напряжение машины.

Мощность работающей без потерь машины была бы равна всегда произведению из напряжения на щетках E на суммарный ток якоря.

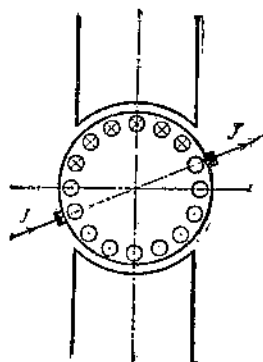


Рис. 151

Механическая мощность, необходимая для покрытия электрической мощности, равняется произведению из угловой скорости якоря на вращающий момент машины. Вращающий же момент сам по себе пропорционален всегда окружному усилию, в свою очередь, как известно, пропорциональному магнитному потоку и силе тока. Таким образом, в результате сдвига щеток уменьшаются одновременно и вращающий момент и напряжение.

Но машина постоянного тока, как и всякая другая машина, обладает потерями. Ее якорь содержит омическое сопротивление R_a , складывающееся из a параллельных сопротивлений, содержащихся в цепях обмотки якоря, из коих каждое равно $a R_a$ омов.

Кроме того, обмотка магнитов также содержит сопротивление R_m . В железе якоря также возникают под действием магнитного потока потери, так как относительно якоря поток является переменным.

Сопротивление якоря R_a вызывает падение напряжения

$$R_a \cdot I_a = a \cdot R_a \cdot \frac{I_a}{a}.$$

На клеммах машины, в случае работы ее генератором, мы не будем больше иметь полного наводимого магнитным потоком напряжения E ; напряжение на клеммах будет несколько меньше

$$E_k = E - R_a \cdot I_a.$$

Генератор будет теперь развивать мощность, равную только

$$E_k \cdot I_a = EI_a - R_a \cdot I_a^2 \text{ ватт.}$$

Тепловые потери в обмотке якоря

$$R_a \cdot I_a^2 = a \cdot a R_a \left(\frac{I_a}{a} \right)^2$$

состоятся из тепловых потерь в отдельных цепях тока.

Но и мощность $E_k \cdot I_a$ не может быть полностью отдана в сеть. У клемм ответвляется, согласно рис. 147, намагничивающий ток I_m , причем

$$E_k = I_m \cdot R_m.$$

В нашем распоряжении останется ток

$$I_k = I_a - I_m \text{ ампер.}$$

Из выражения

$$E_k \cdot I_k = E_k (I_a - I_m) = E_k \cdot I_a - R_m \cdot I_m^2$$

следует, что выделение тепла в обмотке возбуждения отражается уменьшением мощности машины.

Потери в железе якоря вызывают дальнейшее уменьшение полезной мощности; наконец, следует учитывать потери на трение в подшипниках, под щетками на коллекторе и трение о воздух при вращении якоря.

Тепловые потери в якоре зависят, главным образом, от нагрузки. Как указано в главе 11, эти потери должны преобладать над прочими потерями для того, чтобы машина сохраняла постоянный коэффициент полезного действия при значительных колебаниях нагрузки.

Работая в качестве мотора, машина постоянного тока получает извне на своих клеммах напряжение E_k , которое, чтобы пропустить ток якоря I_a сквозь машину, должно преодолевать не только наводимое в якоре напряжение E , но кроме того и омическое падение напряжения в обмотке якоря. Мы в этом случае, следовательно, имеем

$$E_k = E + I_a R_a.$$

Выделяющееся в обмотке якоря тепло в одинаковой степени ухудшает как экономичность мотора, так и экономичность генератора.

Напряжение у клемм E_k вызывает, очевидно, прохождение тока I_m по обмотке возбуждения

$$E_k = I_m \cdot R_m.$$

Энергия, необходимая для покрытия тепловых потерь в обмотке возбуждения мотора, доставляется из сети. Разумеется, что последняя покрывает также потери на трение и потери в железе якоря.

69. ТЕОРИЯ МОТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА.

Для мотора постоянного тока имеет большое значение приведенное в предыдущей главе уравнение равновесия

$$E_k = E + I_a R_a.$$

Последнее при помощи уравнения (22) может быть приведено к следующему виду

$$E_k = \frac{p \cdot n}{60} \cdot \Phi \cdot \frac{z}{a} \cdot 10^{-8} + I_a R_a.$$

Во все время работы заданного нам мотора коэффициент:

$$\frac{p}{60} \cdot \frac{z}{a} \cdot 10^{-8} = K$$

остается без изменения. Переменными эксплуатационными факторами является, следовательно, лишь: n — число оборотов, Φ — магнитный поток мотора и I_a — рабочий ток якоря мотора. Следовательно

$$E = k \cdot n \Phi + I_a \cdot R_a \dots \dots \dots (25)$$

При помощи уравнения (25) мы можем изучить все эксплуатационные свойства так называемого шунтового мотора, обмотка возбуждения которого приключена параллельно обмотке якоря. Это уравнение характеризует мотор лучше, чем часто применявшиеся характеристики.

Представим себе мотор работающим. Приложенное напряжение E_k определяет величину магнитного потока Φ , а внешняя механическая нагрузка задает величину тока якоря I_a , необходимую для равновесия между вращающим моментом и внешним моментом сопротивления. Число оборотов n устанавливается так, чтобы получилось электрическое равновесие.

Увеличим механическую нагрузку. Якорь, вследствие недостаточности его вращающего момента, затормозится; число оборотов упадет. Наведенное напряжение якоря при том же напряжении у клемм сделается меньше; для преодоления сопротивления обмотки якоря согласно уравнения (25) остается теперь свободной большая, чем раньше часть напряжения у клемм; ток в якоре I_a увеличивается, а вместе с ним увеличивается и рабочий момент. Мотор будет работать и при увеличившейся нагрузке; при этом он будет лишь более медленно вращаться.

Падение напряжения $I_a R_a$ обычно мало. Оно достигает лишь нескольких процентов от напряжения у клемм. Шунтовому мотору, поэтому, приходится при возрастании нагрузки лишь немного снижать свои обороты. В этом отношении он похож на асинхронный мотор трехфазного тока. Но в то время, как опрокидывающий момент у асинхронного мотора только в 2—3 раза больше нормального вращающего момента, шунтовой мотор может развить, снижая значительное число своих оборотов, громадные вращающие моменты. Ток в якоре шунтового мотора, как всякий постоянный ток, всегда находится, так сказать „в фазе“ с напряжением и полностью участвует в создании вращающего момента. Особенно сильно сказывается это при пуске.

Находящийся в покое якорь не создает противодействующего напряжения; напряжение у клемм должно преодолевать только омическое сопротивление обмотки якоря. Пусковой ток

$$I_o = \frac{E_k}{R_a}$$

может легко получиться в 20—25 раз больше нормального тока полной нагрузки; во столько же раз и пусковой момент будет превосходить нормальный вращающий момент.

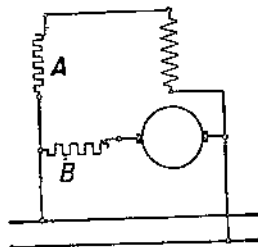


Рис. 152

Конечно, протекающий в моторе ток не должен чрезмерно нагревать обмотку якоря; кроме того, пусковой ток не должен чрезмерно нагружать сеть. Мы вводим поэтому, обыкновенно, в цепь якоря мотора регулируемое пусковое сопротивление (рис. 152), которое совместно с собственным сопротивлением якоря уменьшает толчок тока. Пусковое сопротивление оказывается излишним, когда мотор развернется. Теперь добавочное сопротивление заменяется возросшей наведенной противодействующей электродвижущей силой; в виду этого пусковое сопротивление ступенями выключается.

Представим себе снова мотор работающим. Он, следовательно, будет обладать магнитным потоком Φ , током в якоре I_a и числом оборотов n . На этот раз попробуем изменить число оборотов, не изменяя при этом внешней нагрузки.

Уравнение (25) указывает нам способ, как это сделать. Электрическое равновесие в якоре не нарушается до тех пор, пока остается постоянным произведение

$$\Phi n.$$

Мы можем ослаблять магнитный поток, увеличивая при этом число оборотов, и, наоборот, усиливать магнитный поток, уменьшая число оборотов.

Одновременно с магнитным потоком изменяется также и ток якоря I_a благодаря чему вращающий момент остается постоянным. Но влияние

слагающей $I_a R_a$ на много меньше, чем E . Мы видим, что шунтовой мотор допускает широкую регулировку.

В целях более удобного выполнения регулирования числа оборотов мотора, в обмотку возбуждения включают регулируемое сопротивление, исполняемое в виде так называемого шунтового регулятора. Последний дает нам возможность регулировать ток возбуждения в весьма широких пределах. Вместе с током возбуждения изменяется и магнитный поток; правда, между ними не существует строгой пропорциональности, так как зависимость напряжения от тока возбуждения выражается кривой намагничивания (рис. 153), но все же в довольно широких пределах эта пропорциональность существует.

Кривая намагничивания машины постоянного тока ничем не отличается от так называемой характеристики холостого хода синхронной машины. Эта кривая показывает, что нормально нельзя заставлять работать мотор на много выше колена кривой, так как при этом он теряет свою способность регулироваться.

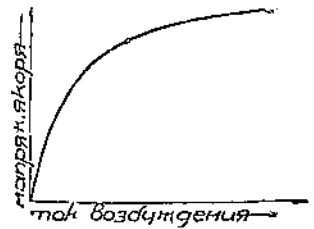


Рис. 153

Может случиться, что ток возбуждения мотора постоянного тока прервется. С исчезновением тока возбуждения пропадет и магнитный поток. Уравнение (25) показывает, что число оборотов мотора при исчезновении в моторе магнитного потока должно бесконечно возрасти. Мы стоим всегда перед опасностью разрыва шунтового мотора.

Поэтому при остановке мотора нельзя обрывать цепи возбуждения. Этого нельзя делать еще и потому, что необходимо дать выход магнитной энергии в виде тепловых потерь в цепи тока возбуждения. Мы должны оставить замкнутой цепь, состоящую из обмотки возбуждения и обмотки якоря, даже после отключения мотора от сети.

70. ШУНТОВОЙ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ МОТОР.

Шунтовой мотор постоянного тока имеет, как мы видели, превосходные качества. Он в состоянии преодолевать мгновенные толчки нагрузки, при возрастании нагрузки он мало снижает свое число оборотов, великолепно берет с места и позволяет производить регулирование числа оборотов почти без потерь. Шунтовой мотор наиболее употребительный из всех моторов постоянного тока. Но имеются производства, для которых постоянство числа оборотов неважно и для которых требуется даже, чтобы при больших нагрузках скорость уменьшалась; в этих производствах главное внимание обращается на вращающий момент. Поэтому крановые и тяговые моторы выполняются очень часто последовательными.

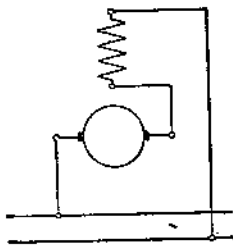


Рис. 154

Последовательный мотор рис. 154 имеет обмотку возбуждения, соединенную последовательно с обмоткой якоря. Ток возбуждения, следовательно, совпадает с током нагрузки. Эти оба тока одновременно увеличиваются и одновременно уменьшаются.

Уравнение электрического равновесия в отношении последовательного мотора выражается следующим образом:

$$E_k = E + I_a (R_a + R_m)$$

или

$$E_k = k \cdot \Phi \cdot n + I_a (R_a + R_m).$$

При увеличении нагрузки увеличиваются I_a и Φ . Мотор, следовательно, должен сдавать гораздо больше свое число оборотов, чем шунтовой мотор в этих условиях. Зато тяговое усилие его значительно увеличилось, так как его вращающий момент стал больше, благодаря возрастанию силы тока в якоре и усилению магнитного потока.

При пуске последовательный мотор развивает большой вращающий момент, так как насыщение в моторе при этом делается максимальным. Большой момент трогания этих моторов представляет большой интерес для эксплуатации подъемников и железных дорог.

Последовательная машина постоянного тока редко применяется как генератор, так как у последнего при постоянном числе оборотов, при уменьшении нагрузки, будет сильно падать напряжение. Но мы требуем от генераторов постоянства напряжения при работе; кроме того, мы должны иметь возможность по мере надобности регулировать напряжение. Генератор с шунтовым возбуждением работает лучше. Правда, при большой нагрузке

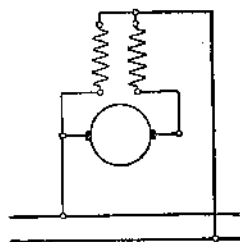


Рис. 155

напряжение несколько садится, но его всегда можно подрегулировать при помощи шунтового регулятора. Несмотря на это, регулирование в главном токе имеет для генераторов также некоторое значение. Можно снабдить генератор двумя обмотками возбуждения — одной шунтовой, а другой последовательной. При правильном устройстве обмоток последовательная обмотка возбуждения при возрастании нагрузки полностью компенсирует вызванное этим обстоятельством падение напряжения. В результате генератор работает при постоянном напряжении. В этом заключается компаундирование напряжения; соответствующая схема изображена на рис. 155. Она представляет собой весьма изящное решение одного из вопросов электромашиностроения; в ней весьма удачно сочетаются все преимущества последовательного и параллельного включения. Кроме того, генераторы можно даже „перекомпаундировать“, т.-е. дать такой перевес последовательной обмотке, чтобы возрастание напряжения несколько перекомпенсировало бы увеличение нагрузки. Таким способом можно уменьшить максимальное падение напряжения сети.

Машины постоянного тока рассчитываются на магнитодвижущую силу и магнитный поток определенной величины. Магнитодвижущая сила при нагрузке пропорциональна всегда числу проводников обмотки якоря и току нагрузки в последней; она предопределяет, таким образом, сечение обмотки якоря. Магнитный же поток определяет размеры корпуса магнитов.

После того, как установлены число проводников, ток в якоре и магнитный поток, остается еще выбрать напряжение, а, следовательно, и мощность машины. Напряжение, если пренебречь потерями, пропорционально, очевидно, числу оборотов.

В машинах переменного тока мы более связаны в своем выборе. Число оборотов у них зависит от числа периодов. Машины же постоянного тока ограничены в своем числе оборотов лишь постольку, поскольку увеличиваются, вследствие возрастания числа периодов, потери в железе якоря. При этом нужно учесть также затруднения в коммутации, наступающие, как мы увидим позже, при большом числе оборотов.

Весьма ценным является то, что мы можем выбрать любое желательное нам число оборотов для работы машины при нормальной нагрузке. Далее,

мы имеем возможность применять заданную машину для условий работы, отличающихся от предположенных при сооружении машины.

Например, 10-сильный шунтовой мотор на 2000 об./мин. для рабочего напряжения 440 вольт при напряжении 220 вольт и 1000 об./мин. может быть применен, как 5-сильный; в первом случае вся обмотка возбуждения включалась последовательно к зажимам машины, во втором случае она разделяется на две параллельных ветви. Ампервитки возбуждения после переключения не изменяются. Приложенное к якорю половинное напряжение при половинном числе оборотов встречает противодействующее напряжение, имеющее нужную нам величину. Вообще говоря, мощность электрической машины пропорциональна произведению из напряжения, величина которого может быть выражена следующим образом

$$E = k \cdot p \cdot n \cdot \Phi \cdot z \cdot 10^{-8}$$

На силу тока в проводнике I_1 . При заданных наружных размерах машины и постоянной величине силы тока и плотности силовых линий магнитный поток Φ обратно-пропорционален числу полюсов. Мощность машины в этом случае зависит исключительно от числа оборотов, которому она пропорциональна. Машина мощностью 10 kW при 1000 об./мин. имеет одинаковые размеры с машиной постоянного тока мощностью 20 kW при 2000 об./мин. Число полюсов совершенно не отражается на мощности машины постоянного тока; с увеличением полюсов лишь возрастают потери в железе якоря.

У машин же переменного тока при увеличении числа полюсов число оборотов должно уменьшиться, что необходимо для сохранения периодичности. В виду этого при равных наружных размерах 8-ми полюсная машина переменного тока в состоянии развить вдвое меньшую мощность, чем такая же машина постоянного тока с 4 полюсами.

71. ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ КРИВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХОЛОСТОГО ХОДА.

Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения заставляет проходить магнитный поток полюсов прежде всего через воздушный зазор между полюсным башмаком и окружностью якоря. Входящий в железо якоря магнитный поток сильно сгущается в зубцах; индукция его в этом месте, обыкновенно, доходит до 20000 гауссов. Только пройдя основание зуба магнитный поток может располагать всей шириной железа. Здесь индукция сильно падает (рис. 156). То же самое происходит и в случае неподвижных магнитов. Полюсам придают, по возможности, минимальное поперечное сечение, чтобы сократить длину витков обмотки возбуждения. Но в результате подобной экономии меди в обмотке возбуждения не должно получаться чрезмерной индукции. В станине, разумеется, получается незначительная величина индукции.

Зная число силовых линий магнитного потока, мы подсчитываем индукцию в отдельных участках на пути магнитного потока, определяя

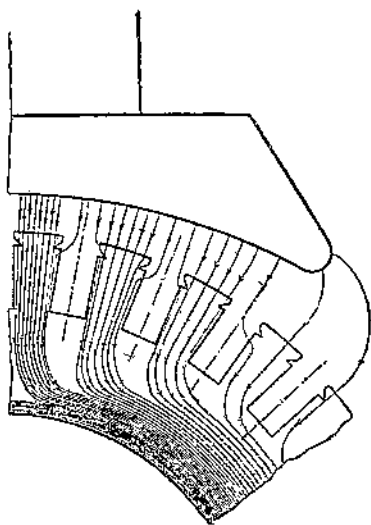


Рис. 156

при помощи кривой намагничивания необходимое число ампервитков на единицу пути потока; помножая это число ампервитков на длину соответствующего участка, мы получим, наконец, необходимое для получения заданного потока число ампервитков; этим определяется одна точка на кривой намагничивания машины (рис. 158), или же на характеристике холостого хода. В результате повторения описанного приема мы определим на искомой кривой несколько точек. Этот же метод в главе 31 был уже нами применен в отношении синхронной машины. Непостоянство магнитной проницаемости железа отражается, конечно, и на характеристике холостого хода машины постоянного тока. Важно выловить в чем именно состоит это влияние. Небезразлично также, на каком месте характеристики расположена точка, соответствующая нормальной полной нагрузке.

Как нам известно, машина постоянного тока весьма легко поддается регулировке. Мотор постоянного тока, например, меняет число своих оборотов в таких же пределах, в каких изменяется его магнитный поток. Очевидно, что в целях экономии меди в обмотке возбуждения желательно получить характеристику холостого хода возможно более прямолинейной.

Но прямолинейная характеристика имеет также и свои опасности. Представим себе совершенно ненагруженный или же слабо нагруженный генератор. Пусть его напряжение при постоянном числе оборотов пропорционально магнитному потоку. Но в случае шунтового генератора напряжение якоря определяет собой также величину магнитодвижущей силы возбуждения. Но если бы магнитный поток был бы пропорционален магнитодвижущей силе возбуждения, то на обмотке якоря могло бы получиться любое по величине напряжение; последнее приобрело бы неустойчивый характер.

Криволинейная форма характеристики холостого хода делает напряжение якоря устойчивым и не зависящим от случайности. Таким образом влияние непостоянства магнитной проницаемости железа весьма благотворно. Также благотворно оно и для шунтового мотора постоянного тока, который должен иметь устойчивое число оборотов при заданной величине приложенного напряжения у клемм. Этим объясняется, почему мы заставляем машину постоянного и переменного тока работать несколько выше колена кривой характеристики холостого хода. Колено придает эксплуатации необходимую устойчивость; в то же время на самом колене подъем кривой происходит не слишком медленно, что имеет место уже значительно выше колена. Мы можем, следовательно, без затруднений производить известную регулировку; точно так же и ниже колена в нашем распоряжении остается достаточно возможностей в этом отношении.

Однако, характеристика холостого хода с резко выраженным коленом нежелательна. Важно уметь правильно разбить отдельные участки пути магнитного потока. Большая часть магнитного сопротивления машины заключается в воздушном зазоре и в зубцах. Правильное распределение ролей между отдельными участками имеет большое значение.

Все обмотки возбуждения, которые должны дать возможность производить регулировку магнитного потока, т.-е. обмотки возбуждения синхронной машины и машины постоянного тока, должны быть рассчитаны на магнитодвижущую силу, по величине превышающую таковую нормальную при полной нагрузке. Это само собой понятно. Мы должны иметь возможность повышать возбуждение сильно нагруженного генератора, и не должны также ограничивать число оборотов мотора постоянного тока.

Магнитодвижущая сила возбуждения может быть уменьшена от максимального своего значения до нормальной величины посредством введения части шунтового регулятора. Этот регулятор позволяет производить регулировку вверх и вниз.

В случае синхронной машины мы свободны в выборе напряжения для обмотки возбуждения. Собственный возбудитель может давать большое и малое напряжения, — по желанию, чем достигается косвенное регулирование напряжения на магнитном колесе синхронной машины и устраняются тепловые потери, неизбежные при непосредственном регулировании.

72. ОБМОТКА ВОЗБУЖДЕНИЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

Все обмотки возбуждения электрических машин, питаемые постоянным током, имеют одну особенность, которую необходимо здесь особо отметить, так как она придает вопросу возбуждения своеобразное освещение.

Когда мы пытаемся вызвать в полюсе необходимую магнитодвижущую силу, мы должны помнить о том, что заданное напряжение возбудителя E_k устанавливает ток возбуждения I_m , величина которого зависит только от сопротивления обмотки R_m . Сопротивление возрастает при увеличении числа витков; но и магнитодвижущая сила увеличивается при возрастании числа витков и, кроме того, может возрасти или уменьшиться в зависимости от силы тока возбуждения.

Возьмем сначала один виток, которому придадим сечение F (в кв. мм); длина витка l (м) определяется периметром полюса. Приняв во внимание удельное сопротивление ρ меди, получим сопротивление

$$R_m = \rho \cdot \frac{l}{F}$$

и магнитодвижущую силу

$$\frac{E_k \cdot I}{\rho \cdot l}$$

Мы не поможем делу, если добавим еще второй виток. От этого величина сопротивления удваивается, ток возбуждения уменьшается вдвое, число витков увеличивается вдвое; в результате магнитодвижущая сила остается прежней. Итак мы видим, что магнитодвижущая сила обмотки возбуждения не зависит от числа витков обмотки.

Есть только один выход. Изменить сечение F витка. Чем больше выбрать это сечение, тем сильнее можно получить возбуждение. Если мы стремимся получить магнитодвижущую силу $I_m \cdot W_m$, то мы должны изменить сечение

$$F = \frac{I_m \cdot W_m \cdot \rho \cdot l}{E_k}$$

Почему же мы все-таки применяем на полюсах большое количество витков, а не ограничиваемся одним витком? Это происходит только потому, что мы боимся выделения тепла, могущих повредить обмотку возбуждения. Мы ограничены определенной плотностью тока

$$\frac{I_m}{F}$$

Отсюда получаем необходимое число витков

$$W_m = \frac{E_k}{\rho \cdot l} \cdot \left(\frac{F}{I_m} \right),$$

чем окончательно определяется обмотка возбуждения.

Понятно, что замыкания витков в обмотке возбуждения мало опасны. Коротко замкнутый виток отключен, он бездействует и не влияет совершенно на магнитодвижущую силу. Только плотность тока возрастает в здоровых витках, а вместе с ней возрастают и тепловые потери в обмотке.

Поэтому витки обмотки возбуждения обыкновенно слабо изолированы друг от друга. Достаточно тонкого слоя хлопчатобумажной пряжи, шелковой оплетки, слоя эмали для получения удовлетворительной изоляции. Даже естественного слоя окиси голого алюминиевого провода достаточно для этой цели. Этому обстоятельству обязан алюминий своим внедрением в электромашиностроение. В результате мы видим, что обмотка возбуждения в своем исполнении сильно отличается от других рабочих обмоток электрических машин.

73. МАГНИТНЫЙ ПОТОК ЯКОРЯ И КОМПЕНСАЦИОННАЯ ОБМОТКА.

При изучении машины постоянного тока мы до сих пор всегда имели в виду магнитный поток, образованный только обмоткой возбуждения; мы не принимали во внимание влияния, оказываемого на поток магнитодвижущей силой обмотки якоря. Но разве для коллекторных машин оказывается недействительным тот принцип, что магнитный поток образуется всегда совместным действием первичной обмотки (обмотки возбуждения) и обмотки якоря? Разве якорь машины постоянного тока не образует никакой магнитодвижущей силы?

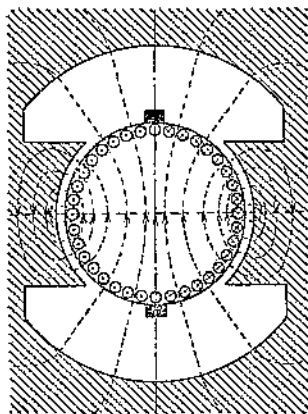


Рис. 157

Само собой разумеется, что якорь машины постоянного тока также имеет свой магнитный поток, если только через него проходит ток нагрузки. Рис. 155 показывает, что действие обмотки якоря машины постоянного тока в магнитном отношении подобно действию описанной в главе 19 распределенной обмотки магнитного колеса с явно выраженными полюсами.

В нашем случае магнитодвижущая сила между полюсами встречает большое сопротивление (рис. 157). Поэтому поток якоря не имеет желательной нам формы треугольника; согласно рис. 158, острие кривой магнитного потока сильно притуплено. Поток приобретает полностью свойства поперечного потока, изученные нами в главе 41.

Рис. 158 показывает, что поток якоря не ослабляет и не усиливает потока машины; он только усиливает последний с одного края, ослабляя в такой же степени его с другого края. Сказанное остается в силе до тех пор, пока щетки остаются в нейтральной зоне. Если щетки сдвинуть, тогда поток якоря окажет искажающее влияние, как изображено на рис. 159. В магнитном потоке якоря самым замечательным является тот факт, что он находится в покое относительно станины, хотя сам якорь вращается. Текущая обмотка, заключающаяся между щетками коллектора, является

также обмоткой неподвижной; всякая постоянная обмотка якоря была бы обмоткой подвижной.

У всех коллекторных машин поток якоря может быть передвинут. Осью этого потока всегда является соединительная линия между подводящей и отводящей ток щетками. Мы можем, передвигая щетки, переставлять тем самым ось потока якоря.

Магнитный поток якоря коллекторной машины, возбуждаемый неподвижной обмоткой вращающегося якоря, может быть компенсирован дей-

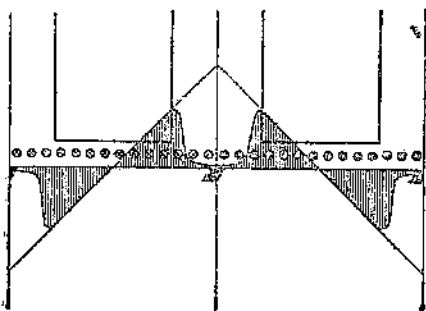


Рис. 158

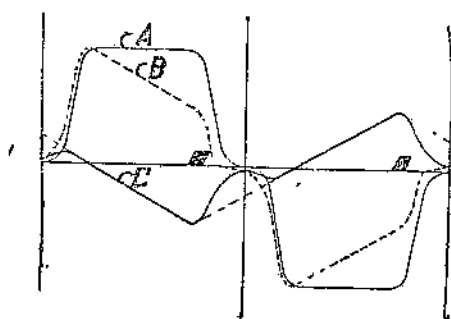


Рис. 159

ствием другой неподвижной обмотки, магнитодвижущая сила которой направлена навстречу. Для этой цели мы можем устроить в полюсах пазы (рис. 160) и заложить в них обмотку, магнитное действие которой направлено как раз навстречу действию обмотки якоря. Разумеется, что через компенсационную обмотку должен протекать ток якоря.

Коллекторные машины позволяют производить компенсацию потока якоря, так как только у них последний возбуждается неподвижной обмоткой. Разумеется, что компенсационная обмотка должна занимать всегда одно и то же положение по отношению к компенсируемой обмотке.

При таком положении вещей сильно уменьшается влияние магнитодвижущей силы якоря на возбуждение магнитного потока машины. Если мы имеем дело с машиной постоянного тока, снабженной компенсационной обмоткой, то мы можем не принимать во внимание действия магнитодвижущей силы якоря. Мы не должны иметь, как в синхронной машине, большую магнитодвижущую силу в первичной обмотке, по сравнению с которой магнитодвижущая сила во вторичной обмотке оказалась бы незначительной. Нас ничто не вынуждает, как прежде, увеличивать воздушный зазор для ограничения действия магнитодвижущей силы якоря. Машины постоянного тока могут свободно работать при малом воздушном зазоре, чем достигается экономия меди в обмотке возбуждения.

До тех пор пока щетки помещаются в нейтральной зоне, мы, даже в случае некомпенсированных машин постоянного тока, не должны обращать такого большого внимания на поток якоря, как это приходилось делать для синхронных машин. Машина постоянного тока работает всегда, если можно так выразиться, с коэффициентом мощности 1,0. Тем не менее,

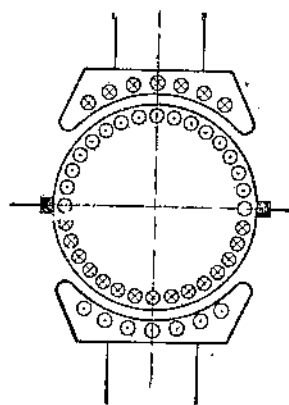


Рис. 160

лучше делать воздушный зазор не слишком малым, так как последний будет сглаживать показанное на рис. 158 искажение главного потока потоком якоря.

Как мы увидим позже, у старых машин постоянного тока из соображений улучшения коммутации тока приходилось сдвигать щетки из нейтральной зоны. Следовательно, мы имели такое же положение, как в случае синхронной машины, когда требовалось учитывать действие отстающего тока. Поэтому приходилось у старых машин постоянного тока брать воздушный зазор большим для ограничения действия магнитодвижущей силы обмотки якоря.

Развитие машин постоянного тока пошло по пути ослабления обмотки возбуждения. Очень старые машины, построенные из плохого железа, имели колоссальные полюсы, чтобы дать место для громадной обмотки возбуждения. Применение более хорошего железа уменьшило этот расход и позволило поместить обмотку возбуждения ближе к охлаждающему току воздуха вращающегося якоря. Вскоре последовало решение проблемы коммутации, в результате чего отпала надобность в сдвиге щеток из нейтральной зоны. Воздушный зазор стало возможным уменьшить; обмотка возбуждения сильно сократилась. Если использовать, кроме того, последнее преимущество коллектора — компенсирование, то обмотка возбуждения получится совсем скромных размеров.

Мы сравнительно мало строим компенсированные машины постоянного тока, хотя, как мы увидим позже, при построении коллекторных машин широко пользуются компенсационными обмотками. В машинах же постоянного тока компенсационная обмотка не оправдывается. Расход меди на нее не окупается вызываемой ею экономией в меди обмотки возбуждения. У коллекторных машин переменного тока появляются другие причины, делающие компенсацию неизбежной.

74. КОММУТАЦИЯ ТОКА МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА.

Коллектор дал нам машину постоянного тока, он позволяет производить компенсирование потока якоря; для коллекторных машин переменного тока он приносит ряд других огромных преимуществ: компенсация сдвига фаз, регулировку числа оборотов; но вместе с тем он доставляет нам и тяжелую заботу, связанную с коммутацией тока в нем. Относительно проблемы коммутации тока появилась громадная литература, и производились бесчисленные опыты. Вследствие необыкновенных трудностей в эксплуатации, многих постигали при этом тяжелые разочарования. Проблема коммутации является, действительно, весьма сложной. В рамках краткого изложения принципа действия электрических машин, этот вопрос исчерпать сколько-нибудь полно нельзя.

Но чтобы понять работу коллекторной машины, не требуется вникать слишком глубоко в явления коммутации; сущность последней достаточно проста. Pichelmauer дает весьма ясное и простое изложение этого вопроса. Последнего вполне достаточно для достижения поставленной нами цели.

Пока мы будем заниматься коммутацией тока только в машинах постоянного тока. Трудности коммутации в коллекторных машинах переменного тока рассмотрим позднее в порядке углубления поставленной перед нами задачи.

Вся трудность коммутации машин постоянного тока заключается в том, что ток протекающий в проводнике, переходящем под щеткой из одной цепи тока в другую и из одной текущей обмотки в соседнюю, должен полностью изменить свое направление. При этом изменение

направления тока должно произойти в весьма короткое время, равное как раз тому промежутку времени, который необходим для переключения проводника из одной обмотки в другую или для полного перехода щетки с одной коллекторной пластины на соседнюю. Этот промежуток времени тем меньше, чем уже коллекторные пластины и чем больше число оборотов машины.

Изменяющий свое направление постоянный ток в течение периода коммутации является током переменным. Ему приходится бороться с напряжением самоиндукции, противодействующей всякому изменению силы тока. Под влиянием самоиндукции постоянный ток будет сопротивляться произвольному изменению его величины и направления. Но, если щетки будут резко обрывать первоначальный ток и вводить новый ток, противоположного направления, то под действием напряжения самоиндукции должна проскочить искра между обрывающим соединением контактом и покидаемой последним текущей обмоткой. Коллектор при этом сильно страдает, пластины его обгорают, эксплуатация делается крайне хлопотливой, даже невозможной. Коллектор должен работать без искрения, в противном случае его нельзя применять.

В этом коротком описании уже выявлены все трудности коммутации тока. Опасность кроется в напряжении самоиндукции, которую необходимо каким-либо способом уничтожить. Без напряжения самоиндукции коммутация тока не представляла бы, конечно, трудности. Весь вопрос, следовательно, сводится к тому, чтобы как можно больше уменьшить влияние напряжения самоиндукции.

Совершенно невозможно добиться перемены знака тока на обратный, т. е. изменить ток на двойное нормальное его значение, не вызвав при этом появления напряжения самоиндукции. С последним приходится считаться, как с неизбежным явлением. Но можно подумать о том, чтобы создать при коммутации искусственное напряжение, действие которого будет направлено навстречу действию самоиндукции и тем самым будет обезвреживать его. В этом, действительно, и заключается решение нашей проблемы. Но это не так просто. Можно бороться с напряжением при помощи противодействующего напряжения, но для этого нужно весьма точно изучить напряжение самоиндукции. Ток I_a изменяется в продолжение имеющегося в нашем распоряжении промежутка времени T по некоторой кривой (рис. 161). Угол наклона α касательной к этой кривой дает в любой данный момент величину напряжения самоиндукции

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dI}{dt}.$$

Но мы не можем установить тотчас же форму кривой коммутируемого тока. Эта кривая может принимать весьма причудливые формы. Но от нее полностью зависит величина напряжения самоиндукции. Первый шаг при разрешении проблемы коммутации тока заключается в придании соответствующей формы кривой тока коммутации.

Совершенно ясно, чего мы должны при этом добиваться. Кривая коммутации должна, как показано на рис. 161 пунктиром, представлять собой прямую. Только в этом случае напряжение самоиндукции будет

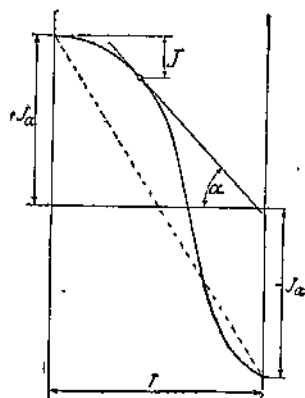


Рис. 161

постоянно и не будет являться уже таким большим злом. После этого уже можно будет что-нибудь предпринять, чтобы избавиться совершенно от вредного действия напряжения самоиндукции.

75. ТЕОРИЯ КОММУТАЦИИ ТОКА.

Явление коммутации тока легко проследить при помощи рис. 162.

Для этого достаточно рассмотреть три соседних секции обмотки якоря и две коллекторных пластины с относящимися к ним соединительными проводами, как это изображено на рис. 162. Наше рассмотрение начнем с того момента, когда движущаяся справа налево относительно якоря щетка как раз перекрывает правую коллекторную пластину.

В этот момент по крайней секции, притекая справа, проходит полный ток ответвления I_a ; такой же величины тока I_a обтекает среднюю секцию, поступая в нее слева. Оба тока, образуя ток $2I_a$, соединяются вместе, и по соединительному проводу направляются к щетке. По левому же соединительному проводу, очевидно, не протекает никакого тока.

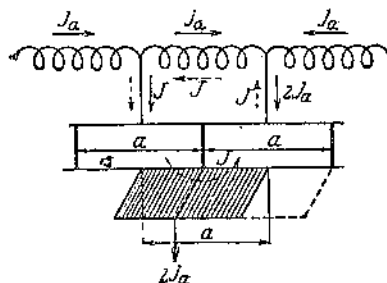


Рис. 162

Когда щетка начинает передвигаться влево, то и в левом соединительном проводе начинает циркулировать ток I ; через среднюю секцию в этом случае протекает ток $I_a - I$, а в правом соединительном проводе ток упадет до $2I_a - I$. По мере увеличения тока I увеличивается также образуемая передвигающейся щеткой поверхность перехода. Наконец, когда щетка полностью перейдет на левую коллекторную пластину, то весь ток ответвления $2I_a$ начнет проходить через левый соединительный про-

вод; по правому соединительному проводу ток проходить перестанет, а в средней секции он полностью переменит свое направление, но сохранит свою первоначальную величину I_a . Этим заканчивается процесс коммутации тока в секции. Мы можем себе легко представить, что распределение тока на поверхности контакта во время процесса коммутации остается таким же, каким оно было, когда щетка находилась над правой коллекторной пластиной; кроме того, мы видим, что ток короткого замыкания I , возрастая от нуля до $2I_a$, протекает по коротко-замкнутому контуру, состоящему из средней секции, двух соединительных проводов и соответствующими коллекторными пластинами и из одной щетки.

На самом деле, при желании из кривой коммутации тока (рис. 161) можно получить кривую изменения тока в секции $I_a - I$ и тока короткого замыкания I . Это обстоятельство значительно облегчает задачу.

Если бы не существовало напряжения самоиндукции, то суммарный ток $2I_a$ всегда протекающий через щетку, распределился бы по соединительным проводам так, чтобы установилось равновесие напряжений поглощаемых отдельными сопротивлениями. Наиболее существенным является переходное сопротивление между коллектором и щеткой; во всяком случае это сопротивление можно довести до такого значения, что по сравнению с ним сопротивления соединительных проводов и коротко-замкнутой секции не будут иметь значения.

Таким образом, в том случае, когда решающим является переходное сопротивление и при отсутствии напряжения самоиндукции, суммарный ток $2I_a$ разделится на I и на $2I_a - I$ так, что на обеих коллекторных пластинах понадобится одинаковое переходное сопротивление.

Когда щетка полностью перекрывает одну коллекторную пластину, то она будет обладать сопротивлением R_b . Если для перехода щетки от одной коллекторной пластины к соседней понадобится время T , то через t секунд от начала коммутации тока щетка на правой пластине создаст следующее переходное сопротивление

$$R_b \cdot \frac{T}{T-t},$$

в то время как на левой коллекторной пластине получится сопротивление:

$$R_b \cdot \frac{T}{t}.$$

Поверхности перехода на правой и левой пластине составят от общей поверхности щетки соответственно следующую часть

$$\frac{T-t}{T} \text{ или } \frac{t}{T}.$$

Отсюда получаем

$$(2I_a - I) R_b \cdot \frac{T}{T-t} = I \cdot R_b \frac{T}{t},$$

или упрощая

$$I = 2I_a \frac{t}{T}.$$

Мы достигли того, к чему стремились. Кривая коммутации представляет собою прямую, как изображено на рис. 161. Напряжение самоиндукции, которую мы не принимали во внимание, во время перехода коммутации сохраняет постоянное значение

$$-L \frac{di}{dt} = -L \frac{2I_a}{T} \dots \dots \dots (26)$$

где L — коэффициент самоиндукции короткозамкнутой цепи.

Исключительно простой расчет, проведенный нами выше, на первый взгляд может показаться необоснованным. Мы не принимали во внимание напряжения в самой индукции не для упрощения расчета, а потому, что заранее предусмотрели возможность точной компенсации этого напряжения наведенным в короткозамкнутой цепи напряжением коммутации. Кроме того, нами было предусмотрено искусственно повысить переходное сопротивление щетки так, чтобы оно немного превосходило прочие сопротивления. Мы видим теперь, что проблема коммутации отчасти является проблемой технологической. Щетки должны обладать значительным переходным сопротивлением, но, с другой стороны, они не должны заметно увеличивать падение напряжения в якоре. Щетки должны обладать достаточной механической прочностью и не должны воздействовать ни химически ни механически на медь коллектора. Всем этим требованиям удовлетворяют хорошие угольные щетки. Они лучше всего оправдали себя на практике и могут считаться удовлетворительным решением части проблемы коммутации тока. Металлические щетки применяются редко и только в том случае, когда нужно уменьшить падение напряжения, что необходимо при малых напряжениях обмотки якоря. В этом случае до известной степени жертвуют безупречностью коммутации ради коэффициента полезного действия машины.

После разрешения вопроса о переходном сопротивлении проблема коммутации тока сводится к совершенной компенсации напряжения самоиндукции в коротко-замкнутой цепи. Эта задача имеет несколько более или менее удовлетворительных решений.

76. КОМПЕНСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ САМОИНДУКЦИИ ПРИ КОММУТАЦИИ ТОКА.

Компенсация напряжения самоиндукции в цепи, состоящей из коротко-замкнутой секции, не всегда имеет одинаковое значение. Очевидно, что мешающее напряжение самоиндукции должно нами учитываться тем тщательней, чем большую склонность оно имеет к увеличению, и чем значительней оно по сравнению с напряжением переходного сопротивления между коллектором и щеткой.

В предыдущей главе мы определили, что напряжение самоиндукции равно

$$E_i = -L \frac{2I_a}{T}.$$

Здесь T есть продолжительность времени коммутации в секундах. Можно выразить T через ширину коллекторной пластины a (см.) и окружную скорость V_k (см./сек.) коллектора

$$T = \frac{a}{V_k}.$$

Отсюда получим

$$E = -L \frac{2I_a}{a} V_k.$$

Коммутация становится затруднительна по мере увеличения скорости вращения машины. Если не принимать специальных мер, то коллектор без искрения у нас получится только у тихоходных машин.

Такое положение существовало на первых порах развития электротехники. Это, однако, тормозило прогресс, так как вскоре уже стало невозможным довольствоваться небольшими рабочими скоростями. С другой стороны, нельзя было идти на слишком большое уширение коллекторной пластины при одновременном уменьшении их числа. Необходимо на этом последнем обстоятельстве становиться подробней.

Каждой машине требуется определенное число проводников. Если мы будем увеличивать при постоянном диаметре коллектора количество коллекторных пластин, то число витков в секции, заключенной между двумя соседними коллекторными пластинами, будет все время уменьшаться. Индуктивность же короткозамкнутой секции пропорциональна квадрату числа витков. Поэтому соотношение

$$\frac{L}{a}$$

делается при увеличении ширины коллекторной пластины еще более неблагоприятным.

Совершенно очевидно, что увеличением диаметра коллектора также ничего нельзя добиться. То, что приобретает нами от увеличения ширины пластины, теряется, вследствие возрастания окружной скорости коллектора. Следовательно, этим путем также нельзя добиться более благоприятного соотношения

$$\frac{V}{a}.$$

В этом положении остается только пытаться уменьшить, насколько возможно, индуктивность секции якоря, число проводников которой задано. Но и эта попытка оказывается напрасной. Для проблемы коммутации очень важно это показать.

Индуктивность секции, при силе проходящего через нее тока в 1 амп. как известно, зависит от магнитного потока, сцепленного с ее витками. Рис. 82 показывает, что этот магнитный поток пересекает паз поперек и замыкается через железо якоря. Размеры паза, в котором находится секция, следовательно влияют на величину индуктивности; но последняя, как легко убедиться, пропорциональна, кроме того, длине якоря l (см). Можно написать

$$L = W^2 \cdot l \cdot \xi \cdot 10^{-8},$$

где W^2 — число витков.

Не следует, однако, забывать, что в коммутации одновременно участвуют, по крайней мере, две секции якоря, так как машина имеет самое меньшее две щетки. Каждая коротко-замкнутая секция со всеми своими проводниками помещается в двух соседних нейтральных зонах, так как там помещаются щетки. Таким образом коротко-замкнутые секции должны находиться очень близко друг от друга и быть заложены или в общих, или в соседних пазах. Они образуют один общий магнитный поток, который поэтому должен быть более интенсивным чем поток рассеяния одной секции.

Коэффициент индуктивности ξ должен быть определен, принимая во внимание этот факт. Легко понять, что ξ можно изменять лишь в небольших пределах и, что, кроме того, в целях только хорошей коммутации нельзя изменять необходимые размеры пазов.

Нобарт и Richelmauer произвели ряд подробных экспериментальных исследований коэффициента индуктивности. Оба обнаружили замечательное постоянство этой величины. По Richelmauer'у этот коэффициент достигает приблизительно

$$\xi = 6 \text{ до } 10.$$

С напряжением самоиндукции после всего сказанного можно бороться только применением некоторого искусственного напряжения коммутации.

Друго пути нет. Только этим способом можно предотвратить искрение коллектора. Прежде чем перейти к описанию способа получения искусственного напряжения коммутации, мы должны придать напряжению самоиндукции более подходящую форму. Для этого заменим окружную скорость коллектора V_k окружной скоростью v , а ширину коллекторных пластин соответствующей шириной коротко-замкнутой секции, т.е. длиной сегмента, занимаемого этой секцией. В электромашиностроении охотно прибегают к понятию линейной нагрузки якоря. Последняя представляет собой не что иное, как магнитодвижущую силу обмотки якоря на 1 см длины окружности последнего. Имеем, следовательно

I_a — ток, протекающий в проводнике якоря в амперах,
 Z — число проводников в якоре,
 D — диаметр якоря в см.

Отсюда линейная нагрузка якоря равняется

$$A = \frac{I_a \cdot Z}{D \cdot \pi}.$$

Подобно тому, как из практики известна максимально допустимая плотность тока в проводниках якоря, так и допускаемая величина линейной

нагрузки также определяется из опыта. Но плотность тока является, более распространенным характеризующим нагрузку машины, понятием, чем линейная удельная нагрузка. Плотность тока колеблется в гораздо меньших пределах. Удельная линейная нагрузка возрастает с увеличением типа машины.

Пусть коротко-замкнутая секция содержит W витков; принимая во внимание двухслойное размещение обмотки секции получим, что секция займет следующую часть окружности якоря

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{2W}{Z}.$$

Заменяя

$$\frac{V}{a} = \frac{2v \cdot Z}{D \pi \cdot 2W} = \frac{v \cdot A}{W \cdot I_a},$$

получим весьма простое выражение

$$\begin{aligned} E_i &= -L \cdot 2I_a \cdot \frac{v \cdot A}{W \cdot I_a} = -W^2 \cdot l \cdot \xi^2 \cdot 2I_a \cdot \frac{v \cdot A}{W \cdot I_a} = \\ &= -2W \cdot l \cdot v \cdot \xi \cdot A \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \dots \dots \dots (27) \end{aligned}$$

77. СДВИГ ЩЕТОК, КАК РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ КОММУТАЦИИ.

Первое время, в тщетном желании избавиться от искрения на коллекторе, искали причину в неправильном положении щеток и пробовали поэтому сдвигать щетки по коллектору. При этом сделали неожиданное открытие, что искрение то уменьшалось, то усиливалось.

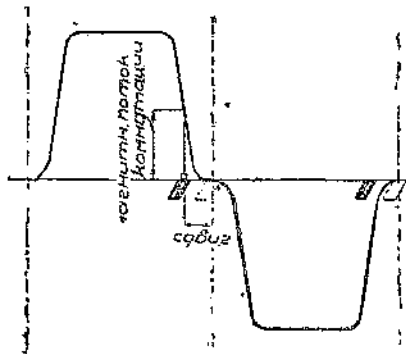


Рис. 163

При некотором терпении и внимании удалось найти такое положение щеток, при котором искрение исчезло совершенно, что следует признать весьма существенным успехом и решением всей проблемы коммутации. Это было в самом деле решением, правда, не самым лучшим. Какие же последствия имеет сдвиг щеток? Очевидно, сдвиг коротко-замкнутой секции из нейтральной зоны. Проводники этой секции попадают под нисходящую часть кривой магнитного потока машины (рис. 163);

они пересекают во время коммутации силовые линии, на них наводится поэтому напряжение, влияющее на коммутацию тока в коротко-замкнутой цепи. Это напряжение направлено одинаково или противоположно напряжению самоиндукции в зависимости от сдвига щеток. Оно может ухудшить или улучшить коммутацию. Наводимое напряжение является, очевидно, полезным в том случае, когда оно направлено противоположно напряжению самоиндукции.

Напряжение самоиндукции имеет одинаковое с коммутируемым током якоря направление, так как при помощи этого напряжения ток стремится сохранить свою величину и направление. Отсюда мы делаем вывод, что мы должны сдвинуть щетки с таким расчетом, чтобы наведенное напряжение в коротко-замкнутой секции действовало навстречу коммутируемому току. Следовательно, в случае генератора, сдвиг нужно

сделать в направлении вращения якоря, а в случае мотора — против направления вращения.

Чем больше нагружена машина, тем сильнее должны быть сдвинуты щетки, так с возрастанием тока якоря увеличивается и напряжение самоиндукции; действующее напряжение коммутации в этом случае должно быть образовано более мощным магнитным потоком.

Но, к сожалению, сдвиг щеток имеет крупный недостаток. Он вызывает безусловно уменьшение напряжения якоря. После сдвига щеток проводники, принадлежащие к одной и той же параллельной ветви, не находятся уж больше под одним и тем же полюсом; иными словами, напряжения в проводниках уж больше не суммируются, так как некоторые из них, правда меньшинство, действуют противоположно остальным.

Таким образом, первое действительное решение проблемы коммутации не благоприятно отзывается на стоимости машины. Этот недостаток сказывается тем сильнее, чем больше должен быть сдвиг щеток, т. е. чем быстроходней машина.

К этому присоединяется еще одно весьма важное соображение, что сдвиг щеток имеет последствием также сдвиг магнитного потока якоря (рис. 164). От этого получается не только искажение главного магнитного потока, но и непосредственное ослабление его. Следовательно, сдвиг щеток обращается увеличением количества меди в обмотки возбуждения.

Наконец, не нужно забывать, что если сдвиг щеток должен быть значительным, очень легко можно дойти до того места, где кривая магнитного потока весьма резко поднимается вверх. В этом случае мы потеряем всякую возможность влиять на процесс коммутации, а напряжение коммутации возрастет до чрезмерной величины.

Приходится, конечно, откинуть всякую мысль о том, чтобы сделать полюсы настолько узкими, чтобы магнитный поток весьма плавно изменялся на протяжении большей части окружности якоря. Это было бы слишком дорогой затеей. Итак мы видим, что в случае быстроходных машин сдвиг щеток ведет к большим трудностям.

История развития машин постоянного тока подтверждает справедливость полученных нами результатов. Она говорит о том, что начали с того, что совершенно не боролись с напряжением самоиндукции, затем перешли к сдвигу щеток, к уменьшению напряжения якоря, увеличению воздушного зазора, в целях ограничения потока якоря, и, наконец, приданию соответствующей формы главному потоку при помощи заостренных полюсных башмаков.

Далее, из истории развития машин постоянного тока мы знаем, что трудности коммутации не были полностью устранены сдвигом щеток; мы знаем о тех особых трудностях, которые пришлось перенести конструкторам, чтобы обеспечить коммутацию быстроходных машин. Коллектор все больше приобретает дурную славу. Вдохнули свободно лишь тогда, когда начал брать перевес трехфазный ток с его бесколлекторными невыскаательными моторами. Легко примирились с невозможностью регулирования числа оборотов и с ухудшенным коэффициентом мощности лишь бы избавиться от неприятностей, связанных с присутствием коллектора.

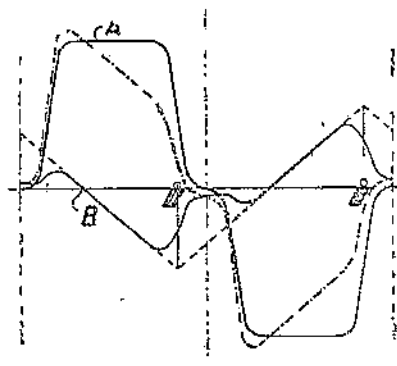


Рис. 164 А — главный магнитный поток; В — магнитный поток якоря.

Коллектор, снабженный только приспособлением для сдвига щеток, в результате оказался несовершенной деталью в электрической машине. Нужно было отыскать что-нибудь получше сдвига щеток. Действительно, было найдено другое вполне удовлетворительное решение. Вполне понятно, что последнее послужило причиной настоящего переворота в области построения электрических машин.

78. ДОБАВОЧНЫЕ ПОЛЮСЫ.

Как всякое большое достижение, решение проблемы коммутации, при помощи добавочных полюсов настолько просто и наглядно, что кажется прямо удивительным, как это раньше не дошли до такого разрешения вопроса. Сдвиг щеток, как мы убедились, во многом вредит машине. Следовательно, нужно стремиться удерживать щетки в нейтральной зоне. С другой стороны, неизбежно наведение добавочного напряжения коротко-замкнутой секции. Но последнее возможно и в том случае, когда проводники коротко-замкнутой секции помещаются в нейтральной зоне и не подвержены, следовательно, воздействию главного магнитного потока. Можно создать особый дополнительный поток. Проще всего это достигается при помощи особых вспомогательных полюсов, так называемых добавочных полюсов, имеющих возможность беспрепятственно создавать в нейтральной зоне вспомогательный магнитный поток (рис. 165).

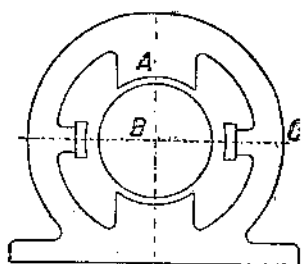


Рис. 165. А — главный полюс; В — нейтральная зона; С — добавочный полюс

Добавочное напряжение получается в результате пересечения силовыми линиями добавочных полюсов проводников коротко-замкнутой секции. Если добавочный поток имеет плотность B_w (гауссов), то добавочное напряжение должно получиться равным

$$E_w = 2W \cdot B_w \cdot v \cdot l \cdot 10^{-8} \text{ вольт;}$$

в этой формуле приняты обозначения главы 76.

Но мы должны иметь

$$E_w = E_i.$$

Поэтому получаем

$$2W \cdot l \cdot v \cdot \xi \cdot A \cdot 10^{-8} = 2W L_w \cdot v \cdot l \cdot 10^{-8}$$

или упрощая

$$B_w = \xi \cdot A \text{ гауссов. (28)}$$

Это весьма изящное решение проблемы коммутации при помощи добавочных полюсов дано Picheimauger'ом. Мы видим, что при сравнительно скромном добавочном потоке получается вполне удовлетворительный результат. Линейная нагрузка якоря равняется, обыкновенно, в среднем около 200 амп./см., а ξ , в среднем, можно принять равным 8. В результате получим 1600 гауссов.

Добавочные полюсы одним ударом устраняют все трудности коммутации тока в машинах постоянного тока. Прежде всего они разрешают задачу правильного компенсирования напряжения самоиндукции не только при полной нагрузке, но и вообще при любой нагрузке.

Когда мы излагали способ борьбы с искрением на коллекторе при помощи сдвига щеток, мы не преминули указать на весьма важное об-

стоятельство, что каждому току нагрузки соответствует свой сдвиг щеток. Напряжение самоиндукции машины пропорционально току нагрузки машины. Добавочное же напряжение, наводимое возрастающей частью главного магнитного потока, почти что не зависит от тока нагрузки.

Картина коммутации тока при помощи сдвига щеток заменяется тем фактом, что при равных нагрузках щетки должны устанавливаться различно, или что при некотором среднем положении щеток следует ожидать больших или маленьких неприятностей, в зависимости от нагрузки.

Добавочные же полюсы можно возбуждать током нагрузки. Небольшое значение применяющейся плотности добавочного потока позволяет применить большой магнитный зазор под добавочным полюсом, что обеспечивает настолько точную пропорциональность между плотностью добавочного потока и током нагрузки, что коммутация тока при любой нагрузке происходит безукоризненно.

Добавочные полюсы парализуют ослабляющее действие потока якоря на главный магнитный поток. Поэтому можно взять воздушный зазор главного потока значительно меньше и перевес магнитодвижущей силы возбуждения над магнитодвижущей силой якоря не столь значительным, как в случае машины без добавочных полюсов.

Размещение щеток в нейтральной зоне у современных машин с добавочными полюсами отразилось на конструкции этих машин. Последние имеют более короткие полюсы, более слабую обмотку возбуждения. Без сомнения, добавочные полюсы являются величайшим достижением в области построения электрических машин постоянного тока.

Мы не можем покончить с теорией машины постоянного тока, не указав на две особенности, имеющие практическое значение. Необходимо еще несколько осветить тот факт, что, обыкновенно, щетки делаются шире коллекторной пластины, и что они почти всегда находятся на оси полюсов.

Если щетку сделать по ширине равной двум коллекторным пластинам, то, очевидно, коммутация будет происходить одновременно в двух секциях; последние будут одновременно коротко замкнуты щеткой. Напряжение самоиндукции коротко-замкнутой секции должно удвоиться, так как обе секции образуют суммарный поток рассеяния, который, как легко убедиться, достигает двойного значения. Но зато период коммутации также увеличился вдвое, так как щетки остаются в соприкосновении с каждой коллекторной пластиной в течение вдвое большего промежутка времени. Следовательно ничего не изменится сравнительно с вышеизложенным простейшим случаем.

Не трудно объяснить также, почему щетки должны находиться как раз под серединой полюса, а не в нейтральной зоне. Из рис. 136 видно, что положение щеток зависит от формы исполнения лобовых соединений секции. Но, где бы ни находились щетки, последние будут накоротко замыкать секцию, стороны которой наводятся как раз в нейтральной зоне; это и является самым главным и об этом, только, и может идти речь при коммутации.

79. ОДНОЯКОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ.

С разрешением проблемы коммутации можно считать, что мы овладели окончательно машиной постоянного тока. Последняя представляет собой простейший вид коллекторной машины. Но в одном для практики весьма важном случае в эксплуатации в принципе действия машины получаются чрезвычайные осложнения. Правда, в этом случае машина

работает, как машина постоянного тока, только частично. Мы имеем в виду один осякорный преобразователь.

В главе 65 был уже указан и описан тот факт, что машина постоянного тока может быть одновременно снабжена и коллектором и контактными кольцами; при этом на контактных кольцах получают переменное, а на щетках коллектора — постоянное напряжение; в случае бездействия коллектора машина обратится в простую синхронную машину. В той же 65 главе было указано, что напряжения переменного тока находятся в определенной жесткой зависимости с напряжениями постоянного тока. Рассмотрим здесь более подробно эту машину при работе ее в качестве преобразователя.

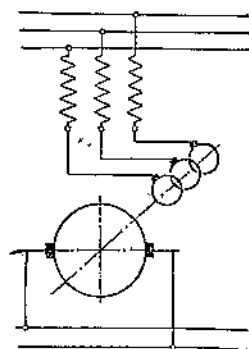


Рис. 166

Если мы хотим получать ток из сети трехфазного тока, чтобы затем отдавать эту энергию в сеть постоянного тока, то мы должны приключить машину к сети трехфазного тока, согласно рис. 166, или непосредственно через контактные кольца, или посредством трансформатора. Если запустить машину со стороны постоянного тока мотором, можно легко добиться синхронизации и работы машины вхолостую, как любого ненагруженного синхронного мотора.

Разумеется, что на щетках коллектора машины должно появиться постоянное напряжение. На контактных кольцах должно установиться напряжение, уравнивающее приложенное напряжение сети; в соответствии с этим равновесием должна установиться подсчитанная в 65 главе величина постоянного напряжения.

Если мы захотим использовать напряжение постоянного тока и включим его на некоторую цепь, то мы этим самым нагрузим наш синхронный мотор. Не трудно определить, как он реагирует на нагрузку на постоянной его стороне.

Электрическое равновесие приложенного со стороны трехфазного тока напряжения и переменного напряжения обмотки якоря, возникающего между контактными кольцами, не терпит никаких отступлений и нарушений. Преобразователь двойного действия, следовательно, будет забирать из сети ток такой величины, чтобы получилось магнитное равновесие между магнитодвижущими силами постоянной и переменной части якоря.

Векторная диаграмма рис. 167 дает величину фазного напряжения якоря, превращенного при помощи контактных колец в трехфазный; это напряжение E_z определяется сетью трехфазного тока. Предположим, что при работе машины вхолостую для наведения указанного напряжения потребуется магнитодвижущая сила возбуждения $I_m \cdot W_m$. При нагрузке к этому прибавляются магнитодвижущие силы постоянного и трехфазного тока нагрузки. Обе этих магнитодвижущих сил взаимно компенсируются, что необходимо для получения равновесия напряжений.

В главе 65 было сказано, что обмотки якоря имеют два слоя проводников. Двухполюсная двухслойная обмотка образует трехфазную обмотку, как показано на рис. 146, так, чтобы при включении треугольником каждая фаза занимала треть окружности якоря в верхнем слое и треть окружности — в нижнем слое, следовательно, каждая фаза займет,

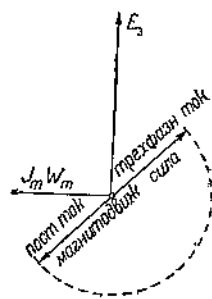


Рис. 167

вообще говоря, треть двойного полюсного деления. В результате получим величину угла обмотки фазной обмотки равным

$$\beta = 120 \text{ электрических градусов.}$$

Если машина обладает по всей длине окружности якоря равномерным воздушным зазором или, иными словами, постоянным магнитным сопротивлением, то фазный магнитный поток якоря получится трапециевидальной формы, а вращающийся поток якоря — синусоидальными, как показано в главе 24. При тех же условиях постоянный магнитный поток якоря, как известно, получился бы по форме треугольника (рис. 158).

Упомянутое выше необходимое магнитное равновесие может иметь место лишь в том случае, когда синусоидальный вращающийся поток и треугольный постоянный поток, согласно рис. 168, имеют одинаковую площадь. Оба потока в сущности неподвижны, так как вращающийся поток вращается относительно якоря с угловой скоростью последнего, но в противоположном направлении. В виду этого, оба потока в любой момент времени могут взаимно компенсироваться.

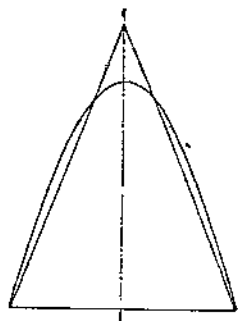


Рис. 168

Весьма интересно несколько глубже осветить этот вопрос. Возьмем для этого двухполюсную машину и обозначим через E_3 эффективное значение приложенного междофазного напряжения, равное наведенному фазному напряжению соединенной в треугольник обмотки якоря; в этом случае получим напряжение постоянного тока

$$E_{gt} = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot E_3$$

Предположим, что машина нагружена постоянным током I_{gr} , что дает в каждой параллельной ветви I_{gl} ампер; на стороне трехфазного тока мы должны ожидать фазный ток I_3 , находящийся в фазе с E_3 ; при этом должно быть соблюдено следующее условие

$$E_{gt} \cdot I_{gl} = 3 \cdot E_3 \cdot I_3$$

Отсюда получим:

$$I_3 = \frac{E_{gt} \cdot I_{gl}}{3 \cdot E_3} = I_{gl} \cdot \frac{2\sqrt{2}}{3\sqrt{3}}$$

Такое же соотношение получается и из условия необходимости магнитного равновесия между магнитодвижущими силами постоянной и переменной части якоря.

Если якорь имеет z проводников, то магнитодвижущая сила постоянной части будет располагать $\frac{z}{2}$ витками, обтекаемым током $\frac{I_{gl}}{2}$ ампер, так что пик треугольной формы кривой пропорционален

$$\frac{I_{gl} \cdot z}{4}$$

Площадь треугольника, отнесенная к полюсному делению, очевидно, пропорциональна

$$\frac{I_{gl} \cdot z}{8}$$

Фазный магнитный поток, наведенный магнитодвижущей силой переменной части, принимает показанную на рис. 63 трапециoidalную форму. Он возбуждается $\frac{z}{6}$ витками, и его максимальная плотность будет пропорциональна

$$I_3 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{z}{6}.$$

Вращающийся магнитный поток, возбужденный совместно всеми тремя фазами, изменяется в пределах обеих показанных на рис. 63 кривых. Несмотря на различие возбуждающих обмоток, явление происходит так, как описано в главе 25. Но различие в углах обмоток (60° — в главе 25, а здесь — 120°) имеет последствием, что в данном случае при тупоугольной форме кривой максимальная индукция в 1,5 раза больше индукции фазного магнитного потока, а остроугольная форма в $\sqrt{3}$ раза больше.

Площадь тупоугольной кривой магнитного потока, отнесенная к величине полюсного деления, будет пропорциональна

$$\frac{2}{3} 1,5 \cdot I_3 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{z}{6} = I_3 \cdot z \frac{\sqrt{2}}{6}$$

а площадь остроугольной кривой

$$\frac{3}{6} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_3 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{z}{6} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_3 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{z}{6} = I_3 \cdot z \sqrt{2} \frac{7\sqrt{3}}{72}.$$

Мы должны иметь

$$\frac{I_{gl} \cdot z}{8} = I_3 \cdot z \sqrt{2} \xi,$$

при чем мы можем рассчитывать, что

$$\xi \approx \frac{1}{6}.$$

Но

$$\xi = \frac{I_{gl}}{I_3} \cdot \frac{1}{8\sqrt{2}} = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{1}{8 \cdot \sqrt{2}} = \frac{1}{6,15}.$$

Следовательно в якоре имеется некоторый остаточный поток. В самом деле в работающем преобразователе влияние остаточного потока сказывается в виде вихревых токов в полюсных башмаках. Данное выше описание принципа действия нагруженного одноякорного преобразователя дает весьма ясное представление об одном весьма важном факте, а именно, что усилением или ослаблением возбуждения, нельзя изменить величину напряжений. Якорь должен на кольцах иметь напряжение, равное приложенному напряжению сети; вместе с этим на щетках коллектора должно появиться напряжение постоянного тока, находящееся в определенном соотношении с напряжением трехфазного тока. Следовательно изменением возбуждения в этом отношении ничего поделать нельзя.

Конечно изменение положения шунтового регулятора не может остаться без последствий. Перевозбужденный одноякорный преобразователь будет забирать опережающий безваттный ток, как обыкновенный синхронный мотор. Безваттный ток тотчас же снижает до нормальной величины усилившийся главный магнитный поток; таким образом равновесие напряжений на стороне переменного тока устанавливается само собой. Таким же образом сетью компенсируется и понижение возбуждения.

80. НАГРЕВАНИЕ В ОБМОТКЕ ЯКОРЯ ОДНОЯКОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ.

Магнитное равновесие магнитодвижущих сил якоря и обязательное совпадение осей магнитных потоков дают возможность разрешить одну весьма важную для работы одноякорного преобразователя задачу.

Якорь обтекается одновременно постоянным и переменным током. Нагревание якоря, следовательно, пропорционально суммарной магнитодвижущей силе. Можно рассчитывать, что нагревание будет меньше чем в том случае, если бы в якоре проходил бы только постоянный, или только переменный ток.

Одно из больших преимуществ одноякорного преобразователя заключается в том, что при работе в качестве преобразователя, он может отдавать значительно большую мощность, чем при работе только в качестве машины переменного или постоянного тока. Как и у любой другой машины, мощность одноякорного преобразователя зависит от количества тепловых потерь, определяющих его рабочую температуру.

Рис. 67 уже показал нам, что при образовании остроугольного вращающего магнитного потока ось последнего, а, следовательно, и ось щеток совпадает с концом фазной обмотки. Такую же картину мы получаем и в случае двухслойной обмотки. В этом мы убеждаемся сразу из распределения токов рис. 169.

Двухслойная обмотка якоря в рассматриваемый момент времени получает из сети ток только в двух своих фазах; сила тока в них достигает следующего значения

$$+I_s \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \text{ и } -I_s \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

В каждом ответвлении обеих половин якоря течет ток $\frac{I_{gl}}{2}$. Рис. 169 при некотором рассмотрении показывает, что магнитодвижущая сила постоянного и переменного тока действуют друг другу навстречу.

Согласно рис. 169 двухслойная обмотка распадается на 6 участков, при чем тепловые потери должны быть подсчитаны для каждого из них в отдельности. Если каждый участок содержит омическое сопротивление R то для всех 6 участков мы получим следующее выражение

$$R \left\{ \left(-\frac{I_{gl}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_s \sqrt{2} \right)^2 + \left(-\frac{I_{gl}}{2} \right)^2 + \left(\frac{I_{gl}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} I_s \sqrt{2} \right)^2 + \right. \\ \left. + \left(-\frac{I_{gl}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_s \cdot \sqrt{2} \right)^2 + \left(-\frac{I_{gl}}{2} \right)^2 + \left(-\frac{I_{gl}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} I_s \sqrt{2} \right)^2 \right\}.$$

Подставляя в это выражение определенное в предыдущей главе значение

$$I_s = I_{gl} \frac{2\sqrt{2}}{3\sqrt{3}}$$

получим суммарные тепловые потери в одноякорном преобразователе

$$\frac{22}{36} \cdot I_{gl}^2 R \text{ ватт.}$$

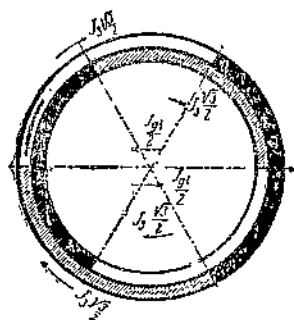


Рис. 169

Тепловые потери только от постоянного тока равнялись бы

$$6 \left(\frac{I_{gl}}{2} \right)^2 R = \frac{3}{2} I_{gl}^2 R \text{ ватт.}$$

Работая в качестве одноякорного преобразователя, машина имеет только

$$\frac{22}{36} \cdot \frac{2}{3} = 40,7\%$$

тех потерь, которые она имела бы работая чистой машиной постоянного тока при той же нагрузке I_{gl} . Поэтому мощность машины может быть увеличена в

$$\sqrt{\frac{1}{0,407}} = 1,57 \text{ раз больше.}$$

Зато при втором предельном случае, когда форма кривой вращающегося магнитного потока якоря тупоугольна, мы имеем более неблагоприятную картину. В этом случае тепловые потери достигают 64,7% от тепловых потерь равной по мощности машины постоянного тока. В среднем тепловые потери трехфазного одноякорного преобразователя равняются около половины потерь машины постоянного тока; допускаемое увеличение мощности достигает до 40%.

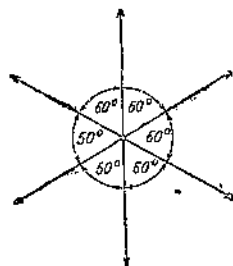


Рис. 170

Преимущества одноякорного преобразователя выступают особенно рельефно, если мы сделаем его шести фазным. Как показывает точный подсчет, в этом случае увеличение мощности может быть доведено до 100%. Эта идея легко может быть претворена в жизнь, так как шести фазный ток может быть легко преобразован в трехфазный. Векторная диаграмма рис. 170 показывает, что два фазных напряжения шести фазной системы всегда направлены противоположно. Поэтому, если мы, согласно рис. 171, разложим вторичную обмотку трехфазного трансформатора на каждом стержне на две половины и соединим в виде нулевой точки средние точки всех обмоток, то мы получим на вторичной стороне шести фазную систему.

После всего сказанного понятно, что преобразователь постоянного трехфазного тока всегда выполняется шести фазным. Кроме того, преобразователь всегда нуждается в трансформаторе, чтобы избавиться от жесткой зависимости между обоими напряжениями якоря.

Несмотря на необходимость иметь всегда трансформатор, шести фазный преобразователь всегда более экономичен, чем мотор-генератор. Как машина постоянного тока, он должен быть построен только на половину преобразуемой мощности, в то время, как мотор-генератор должен состоять из двух машин, каждая из которых должна быть построена на полную мощность. К этому присоединяется еще одно обстоятельство, что и мотор-генератор часто должен быть снабжен трансформатором, а именно в том случае, когда требуется преобразовать ток высокого напряжения. Наконец одноякорный преобразователь имеет значительно меньшие потери при преобразовании. Указанное превосходство одно-

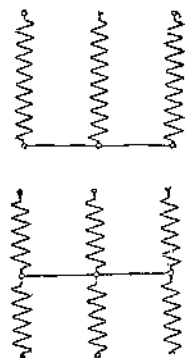


Рис. 171

якорного преобразователя настолько разительно, что существование наряду с одноякорным преобразователем еще и других типов преобразователей было бы непонятным, если бы не некоторые другие соображения и опасения. А опасения действительно есть. Одноякорный преобразователь дешев, он обладает высоким коэффициентом полезного действия, но имеет в то же время большие недостатки. Пока мы знаем его только с самой лучшей стороны. Но уже сейчас нам известно, что регулировка напряжения у него затруднительна. Но регулировка напряжения не есть самое большое затруднение. Как мы знаем, эта трудность может быть преодолена. Имеются действительно серьезные препятствия. Они имеют место, когда происходит преобразование постоянного тока в трехфазный (до сих пор мы рассматривали преобразование трехфазного тока в постоянный).

81. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОДНОЯКОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ.

Приключая одноякорный преобразователь к сети постоянного тока и развешивая его в качестве мотора постоянного тока и нагружая затем со стороны трехфазного тока, мы не обнаружим в работе преобразователя никаких особенностей. Попрежнему оба магнитных потока якоря должны взаимно компенсироваться; попрежнему оба напряжения находятся в жесткой друг от друга зависимости.

Вся разница между обоими возможными направлениями преобразователя заключается в том, что нагруженный электрически со стороны постоянного тока одноякорный преобразователь при правильном возбуждении, работает в качестве синхронного мотора и забирает из сети только ваттный ток; если же преобразователь будет нагружен со стороны трехфазного тока, то будет иметь место сдвиг фаз между током и напряжением, величина которого будет зависеть от характера потребителей трехфазной сети.

В главе 79 мы имели возможность показать, что действие магнитодвижущей силы постоянного и трехфазного тока взаимно уравновешивается; последнее необходимо для соблюдения баланса энергии. Строго говоря, это справедливо только для действующих магнитодвижущих сил образованных ваттными токами. Магнитодвижущая сила постоянного тока всегда проявляется полностью в то время, как магнитодвижущая сила трехфазного тока активна лишь в своей некоторой части.

Одноякорный преобразователь при правильном возбуждении обладает только действующей магнитодвижущей силой, а при неправильном возбуждении он начинает забирать из сети безваттные токи. Картина магнитного равновесия для этого общего случая должна быть уточнена следующим образом.

Магнитодвижущая сила трехфазного тока одноякорного преобразователя распадается на активную и неактивную слагающие. Активная магнитодвижущая сила всегда уравновешивается магнитодвижущей силой постоянного тока. Неактивная же магнитодвижущая сила совместно с магнитодвижущей силой обмотки возбуждения создает главный магнитный поток.

Величина главного магнитного потока одноякорного преобразователя работающего синхронным мотором и одновременно генератором постоянного тока, является заданной. Поэтому неактивная магнитодвижущая сила преобразователя устанавливается такой величины, что она совместно с магнитодвижущей силой возбуждения создает именно предписанный магнитный поток.

В том случае, когда одноякорный преобразователь работает в качестве синхронного генератора и одновременно мотора постоянного тока, неактивная магнитодвижущая сила устанавливается в зависимости от характера нагрузки сети. В виду этого главный магнитный поток ослабляется; и преобразователь начинает работать при пониженном напряжении; при этом самое существенное то, что мотор постоянного тока начинает изменять свое число оборотов.

В этом и заключается причина неприменимости одноякорного преобразователя для преобразования постоянного тока в трехфазный. Колебание числа оборотов вызывает колебание числа периодов трехфазного тока преобразователя. Но дело не только в этом: большая индуктивная нагрузка может повести к столь значительному ослаблению главного магнитного потока, что умформер, как и всякий шунтовой мотор, может понести.

Картина была бы, однако, еще не полной, если бы мы не остановились на возможности параллельной работы преобразователя со стороны трехфазного тока с прочими питающими сеть генераторами. В этом случае, нужно сказать, преобразование постоянного тока в трехфазный оказывается возможным.

Здесь имеет место одно благоприятное обстоятельство, улучшающее работу нагруженного со стороны трехфазного тока преобразователя, так как напряжение и число периодов трехфазной сети поддерживается неизменным. Преобразователь должен подчиниться этому напряжению и числу периодов, и в нем должен образоваться главный магнитный поток заданной величины; в преобразователе возникают безваттные токи, величина которых позволяет получить правильное возбуждение; получение обусловленных характером нагрузки безваттных токов перекладывается на другие питающие сеть генераторы.

Нередко случается, что электрическая установка работает частью на постоянном, частью на переменном токе. В этом случае установка имеет собственную сеть трехфазного и постоянного тока и располагает необходимыми для этих обеих сетей генераторами. В таком случае желательно иметь возможность взаимного обмена энергией между обеими сетями; преобразование должно происходить то в одном, то в другом направлении. Одноякорный преобразователь, зависящий от главных генераторов, находится здесь вне всякой опасности.

Имеющийся в нашем распоряжении источник постоянного тока дает нам возможность удобного пуска. Преобразователь разгоняется, как мотор постоянного тока, после чего он синхронизируется. Здесь есть некоторые особенности, на которых следует остановиться.

Если синхронизация производится на стороне высокого напряжения трансформаторов преобразователя, то при пуске нужно отсоединить обмотку низкого напряжения трансформатора от контактных колец; выключатель низкого напряжения можно врубить лишь только, когда машина тронется. При малом числе оборотов обмотка трансформатора почти не имеет никакого индуктивного сопротивления, представляя для пускового тока весьма легкий путь и снижая значительно пусковой момент.

Если необходимо пустить одноякорный преобразователь со стороны трехфазного тока, то приходится поместить между выступающими полюсами особую коротко-замкнутую обмотку, позволяющую пустить преобразователь в качестве асинхронного мотора. Но затруднение заключается еще в другом. При пуске вращающийся поток якоря движется относительно магнитов машины и наводит поэтому в обмотке возбуждения

постоянного тока значительные напряжения. В виду этого обмотку возбуждения нужно замыкать накоротко. Только при наступлении синхронизма магнитный поток перестает пересекать витки обмотки возбуждения, после чего можно машину возбудить, синхронизировать и включить в сеть трехфазного тока.

Нужно обратить внимание еще на то, что полярность магнитов при описанном способе пуска зависит исключительно от случайности. Поэтому необходимо устроить обмотку возбуждения таким образом, чтобы эксплуатация не представляла никаких затруднений.

82. РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПЯЖЕНИЯ ОДНОЯКОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ.

Нечувствительность одноякорного преобразователя к регулированию напряжения при помощи шунтового регулятора не кажется по сравнению с описанными в предыдущей главе трудностями столь значительным недостатком. В нашем распоряжении есть средство устранить последний. Электрическое равновесие между приложенным напряжением трехфазного

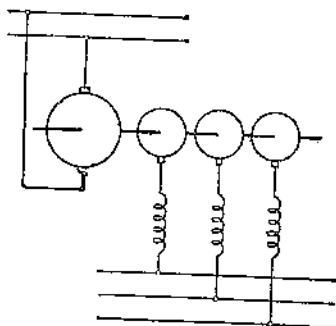


Рис. 172

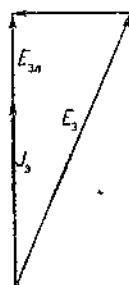


Рис. 173

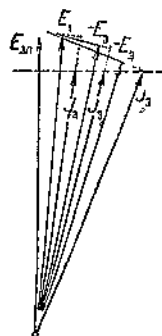


Рис. 174

тока и наведенными напряжениями в якоре может быть осуществлено при помощи получающихся на контактных кольцах напряжений только при условии отсутствия падения напряжения. Но последние имеют место всегда; напряжение якоря E_3 синхронного мотора совместно с падением напряжения в сопротивлении уравнивают приложенное напряжение E_{3n} (рис. 173).

Роль омического падения напряжения при этом незначительна, вследствие малости омического сопротивления. Незначительность тепловых потерь является как раз наиболее сильным местом преобразователей. Мы не должны стараться искусственно увеличивать омическое падение напряжения, так как это связано с увеличением тепловых потерь.

Зато мы имеем во всякое время возможность увеличивать индуктивное падение напряжения, не ухудшая при этом коэффициента полезного действия машины; проще всего это достигается включением индуктивностей между зажимами контактных колец и сетью (рис. 172).

Рассмотрим сначала случай, когда умформер, работающий генератором постоянного тока и синхронным мотором, представляет для сети безындукционную нагрузку. Тогда, согласно рис. 173, вектор тока нагрузки I_3 находится в фазе с вектором напряжения сети E_{3n} , в индуктивном добавочном сопротивлении x (ом) напряжение сети расходует слагающую $I_3 x$ (рис. 173). Наведенное напряжение якоря E_3 должно теперь уравнивать и остаточное напряжение сети.

Таким образом, если мощность остается постоянной, то, как нетрудно убедиться, мы, изменяя возбуждение, влияем на величину напряжения якоря. При этом, согласно рис. 174, мы вводим в эксплуатацию сдвиг фаз между током и напряжением. Зато при достаточной величине введенной индуктивности мы можем изменять в довольно широких пределах напряжение трехфазного тока, а, следовательно, и напряжение постоянного тока. Стоимость преобразователя не должна увеличиваться от введения необходимого для регулирования напряжения индуктивного сопротивления. Трансформатор, которым всегда снабжается одноякорный преобразователь, также обладает индуктивным сопротивлением; последнее мы можем всегда искусственно увеличить. В виду этого трансформатор преобразователя, обыкновенно, выполняется с весьма большим индуктивным падением напряжения.

Принимая во внимание вышесказанное, следует сделать вывод, что слишком малое падение напряжения в одноякорном преобразователе нужно считать недостатком; этот недостаток устраняется введенным искусственным индуктивным сопротивлением, что позволяет нам производить регулирование напряжения. Слишком малое падение напряжения отражается также на параллельной работе двух одноякорных преобразователей, включенных на общую сеть постоянного тока и не снабженных трансформаторами. Согласно рис. 175 на стороне постоянного тока получается замкнутый контур 1—2—3—4—5—6—7—8, в котором, во избежание перехода выравнивающих токов из одного преобразователя в другой, не

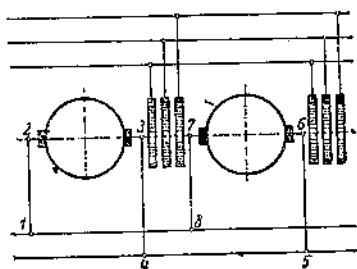


Рис. 175

должно возникать напряжений, в виду этого наведенные напряжения постоянного тока обеих машин должны быть в точности одинаковы. В противном случае возникает выравнивающий ток, компенсирующий разницу напряжений в сопротивлениях в якорях машин.

Совершенно очевидно, что выравнивающий ток, переходящий из одной машины в другую, делается тем больше, чем меньше сопротивление якоря. В результате мы должны ожидать большую неравномерность при параллельной работе обоих одноякорных преобразователей. Кроме того, при отсутствии трансформаторов выравнивающий ток будет протекать по шинам трехфазного тока, отчего получается произвольное распределение нагрузок. Значительно благоприятней распределение нагрузок, когда преобразователи снабжены трансформаторами. В этом случае нужно обращать внимание на то, чтобы нулевые точки обоих соединенных обычно в звезду трансформаторов не были между собой связаны. Нулевой провод, очевидно, снова создал бы возможность обходного пути.

Обзор работы одноякорного преобразователя показывает, что применять его нужно с большой осторожностью. Применяя преобразователь, мы сталкиваемся с значительными трудностями; наряду с большими преимуществами преобразователь имеет и серьезные недостатки.

Необыкновенно низкие первоначальные затраты всегда возвращают наше внимание к этой интересной машине; высокий коэффициент полезного действия делает ее всегда заманчивой. Но вместе с тем нас всегда страшат неприятные особенности одноякорного преобразователя.

Экономические преимущества, связанные с одноякорным преобразователем, часто могут быть использованы. Но сделать правильный вывод можно лишь точнейшим образом представляя себе работу машины и учтя

заранее все эксплуатационные возможности. При тяжелой эксплуатации предпочтительней нечувствительный мотор-генератор. Для теории электрических машин машина типа преобразователя является весьма поучительным примером, на котором лучше всего проследить сущность машины постоянного и трехфазного тока. Коллектор может служить своеобразным преобразователем, так как его можно применить также для преобразования числа периодов.

Машина постоянного тока несомненно принадлежит к группе машин, работающих по принципу всеобщего трансформатора. Точно так же все нижеописанные коллекторные машины являются всеобщими трансформаторами, так как они произошли именно от машины постоянного тока. Они лишь используют особенности коллектора в гораздо большей степени, чем машины постоянного тока.

ВЗ. МАШИНА ПОСТОЯННОГО ТОКА, РАБОТАЮЩАЯ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ.

Мысль заставить работать обыкновенную машину постоянного тока от переменного тока достаточно стара. На этот путь толкнули преимущества мотора постоянного тока. При этом стремились добиться регулируемости числа оборотов, отсутствующей у асинхронных моторов. Нужно отметить, что никогда не добивались получения коллекторных генераторов переменного тока, так как синхронный генератор вполне удовлетворяет всем требованиям эксплуатации. Было бы бессмысленно идти на трудности коммутации тока с единственной целью получить что-нибудь новое.

Совсем другой оборот принял вопрос о коллекторных моторах. Асинхронный мотор — безупречная машина, простая и незыскательная. Впрочем, это относится только к асинхронному мотору трехфазного тока. Однофазный асинхронный мотор, напротив, весьма плохая машина. Последнему не достаёт вращающегося магнитного потока. Его приходится создавать при помощи второй обмотки, в которой ток нагрузки проходит со сдвигом фаз на 90° . Таким образом статор обматывается на подобие двухфазного, рабочий ток в котором разделяется на два разветвляющихся тока, сдвинутых между собой по фазе на 90° ; работа мотора достигается при помощи вспомогательной фазы.

Однофазный асинхронный мотор на практике привиться не смог. Но однофазные моторы переменного тока были нужны, и поэтому продолжали искать решения этого вопроса. В особенности это было важно для электрических железных дорог, благодаря которым этот вопрос приобретал особую актуальность. Последнее и вызвало попытку заставить работать от переменного тока машину постоянного тока, являющуюся как бы однофазной.

Вполне естественно, что стали подумывать также и относительно трехфазных коллекторных моторов. Возможность изменения числа оборотов и компенсирования угла сдвига фаз казались вполне заманчивой целью, так как асинхронный мотор не допускает ни того ни другого.

Но однофазный коллекторный мотор впервые показал, какие новые трудности вызывает работа на переменном токе. Коллектор снова выдержал тяжелое испытание. Получение трехфазных коллекторных моторов не должно обязательно связываться с однофазным коллекторным мотором. Но целесообразно при изучении теории коллекторных моторов переменного тока исходить из теории машин постоянного тока и только потом перейти к коллекторным моторам трехфазного тока.

Если мы начнем с того, что включим нормальную последовательную машину постоянного тока на переменное напряжение с целью превратить ее в однофазный коллекторный мотор, то мы будем вынуждены обратиться к рассмотрению происходящих в машине мгновенных явлений. На протяжении весьма коротких промежутков времени переменное напряжение может быть положено постоянным; в виду этого, машина сохраняет свои основные свойства и для режима работы с переменным током.

Наложенные на коллектор щетки создают все время текущие обмотки, на которые распадается замкнутая обмотка якоря. Щетки делают доступными напряжения якоря, так как они имеют соединение с проводниками, занимающими одинаковое положение относительно магнитов. Отдельные напряжения на проводниках всегда пропорциональны плотности главного магнитного потока в тех местах на окружности якоря, где должны находиться, постоянно сменяясь, проводники текущей обмотки.

Главный магнитный поток машины изменяется в зависимости от числа периодов приложенного напряжения, так как он зависит от тока возбуждения, вызываемого в обмотке возбуждения приложенным напряжением. На щетках коллектора появляются переменные напряжения такой же периодичности. После данного описания явлений ясно, что напряжение на щетках, представляя собой сумму напряжений на проводниках текущей обмотки, должно находиться в фазе с главным магнитным потоком.

Легко обнаружить первое необходимое отличие в исполнении машины постоянного тока от коллекторного мотора однофазного тока. Полюсы и корпус коллекторного мотора однофазного тока должны набираться из отдельных листов, что необходимо для правильного циркулирования главного магнитного потока.

Более существенно второе отличие. При равномерном делении плотности главного магнитного потока максимальное значение напряжения на щетках равно постоянному напряжению, которое получилось бы при работе машины на постоянном токе. Следовательно, если не изменять обмоток машины, эффективное значение напряжения коллекторного мотора достигает только 70% напряжения постоянного тока.

В 67 главе мы определили величину напряжения машины постоянного тока, у которой щетки поставлены в нейтральной зоне, при главном магнитном потоке, равном Φ , общем числе проводников z , числе параллельных ветвей обмотки якоря a , числе полюсов p и n оборотах в минуту

$$E_{gt} = \frac{p \cdot n}{60} \cdot \Phi \cdot \frac{z}{a} \cdot 10^{-8} \text{ вольт.}$$

Так как при любом числе оборотов мы имеем периодичность

$$z = \frac{p \cdot n}{120},$$

то эффективное значение напряжения на щетках равно

$$E_2 = \sqrt{2} \cdot f_2 \cdot \Phi \cdot \frac{z}{a} \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \quad \dots \dots \dots (29)$$

В уравнении (29) Φ попрежнему обозначает максимальное значение главного магнитного потока. Нас не должно смущать появление вторичной периодичности f_2 , не равной, вообще говоря, первичной периодичности f_1 , т.-е. периодичности приложенного напряжения. Наведенное напряжение E_2 имеет периодичность f_1 , что следует из предыдущего изложения. Следовательно,

$$E_{2t} = \sqrt{2} \cdot E_2 \sin 2\pi f_1 t.$$

Нелишне будет здесь вспомнить, что напряжение машины постоянного тока не зависит от формы кривой главного магнитного потока. На этом факте мы подробно остановились уже в 67 главе. Следовательно и напряжение E_a не зависит от формы кривой главного магнитного потока. Оно изменяется по закону синуса, так как наводящий это напряжение магнитный поток также вынужден изменяться синусоидально.

84. НАПРЯЖЕНИЕ ВРАЩЕНИЯ И НАПРЯЖЕНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ.

Вычисленное в предыдущей главе напряжение якоря E_a , возникающее между щетками, когда последние находятся на нейтральной зоне, не является единственным наведенным в якоре напряжением. Это напряжение называется напряжением вращения.

Мы не можем перейти к описанию другого, так называемого напряжения трансформации, не дав некоторых предварительных разъяснений. Прежде всего следует обратить внимание на то, что напряжение вращения так же, зависит от положения щеток, как и напряжение якоря машины постоянного тока.

При описании трудностей коммутации тока в главе 77 нами было уже указано, что всякое перемещение щеток из нейтральной оси уменьшает напряжение на щетках. Текущая обмотка, заключенная между обеими щетками, вследствие сдвига последних, частично находится под различными полюсами, отчего теперь суммируются уже не все напряжения проводников. Речь идет, конечно, о проводниках только верхнего, или только нижнего слоя. Когда щетки находятся в нейтральной зоне, все проводники текущей обмотки помещаются или в верхнем слое, например, под северным полюсом, или же в нижнем слое — под южным полюсом.

Если сдвинуть щетки из нейтральной зоны на половину полюсного деления, то напряжение вращения должно совершенно исчезнуть. В этом случае все текущие обмотки содержат под каждым полюсом половину всех проводников каждого слоя.

Теперь мы можем сделать шаг вперед и оставить якорь совсем без движения. Каждые два следующих друг за другом проводника замкнутой обмотки якоря всегда образуют виток, охватывающий главный магнитный поток больше или меньше, в зависимости от своего положения относительно магнитов. Щетки коллектора создают текущие обмотки, витки которых, даже при работе машины, находятся в покое относительно магнитов.

Сцепление неподвижных относительно магнитов витков якоря с главным магнитным потоком у машин постоянного тока не играет никакой роли, так как в этом случае магнитный поток постоянен. Но как только начнет изменяться магнитный поток, в витках обмотки якоря, даже неподвижных, появится напряжение, которое и называется напряжением трансформации.

Замкнутую обмотку, изображенную на рис. 176, можно выполнить, как показано на рис. 177. Отсюда можно сразу увидеть, что на щетках, расположенных по оси полюсов, полностью появляется сумма напряжений трансформации отдельных витков; напряжения же вращения отсутствуют. Наоборот, если щетки находятся в нейтральной зоне, то, как легко убедиться, исчезает полностью напряжение трансформации, а напряжение вращения получает свое максимальное значение.

Легко обнаружить, что напряжение трансформации должно оставаться от главного магнитного потока на четверть периода. Не трудно

также высчитать величину напряжения трансформации на щетках, когда они поставлены по оси магнитов, т.е. максимально возможное значение этого напряжения.

Мы предполагаем, что главный магнитный поток Φ распределяется синусоидально вдоль окружности якоря. Поэтому он наводит в каждом витке, проводники которого расположены в нейтральной зоне, максимальное напряжение трансформации, так как все его силовые линии проходят через этот виток; наоборот, поток совершенно не влияет на виток, проводники которого помещаются под серединой полюсов.

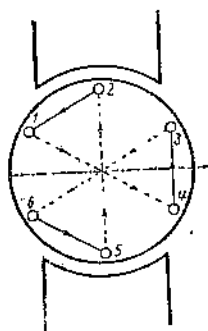


Рис. 176

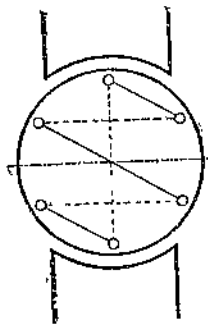


Рис. 177

При равномерном распределении проводников вдоль окружности якоря виток, плоскость которого составляет электрический угол α с осью нейтральной зоны, может охватывать самое большое $\Phi \cos \alpha$ силовых линий. Среднее значение напряжения на витке в $\frac{2}{\pi}$ раз меньше, чем максимальное значение напряжения на витке трансформации, равное

$$\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ эффективных вольт.}$$

Это выражение взято из 3 главы.

Если обмотка якоря содержит s проводников и a параллельных ветвей, то суммарное значение напряжения трансформации получится равным

$$E_0 = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{s}{2a} \cdot \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot 10^{-8} = \sqrt{2} \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot \frac{s}{a} \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \dots (30)$$

Казалось бы, что напряжение трансформации обмотки якоря не может иметь для нас значения, хотя оно и получается как при движущемся, так и при неподвижном якоре. Текущая обмотка, заключенная между щетками, всегда неподвижна. Когда щетки поставлены в нейтральной зоне, напряжение трансформации, наводимое главным магнитным потоком, не может себя проявить.

Но напряжение трансформации образуется не только главным магнитным потоком. Магнитный поток обмотки якоря, поскольку он существует, также наводит напряжения трансформации. Мы не мыслим себе нагрузки без тока в якоре, а следовательно и без магнитного потока якоря.

В главе 73 мы уже рассматривали магнитный поток якоря машины постоянного тока. Осью последнего является ось щеток. Коллекторный мотор однофазного тока также имеет свой магнитный поток якоря с той лишь единственной разницей, что его поток якоря изменяется во времени одинаково с протекающим по якору переменным током.

Итак, должно иметь место напряжение трансформации потока якоря. Это напряжение делается особенно заметным, когда щетки находятся в нейтральной зоне, так как всякое напряжение трансформации на щетках получается максимальным, когда щетки расположены по оси магнитного потока.

Если присмотреться поближе, то легко обнаружить, что напряжение трансформации является не чем иным, как напряжением самоиндукции

обмотки якоря. Якорь обладает не только омическим падением напряжения, как всякий якорь постоянного тока, но в нем, кроме того, имеет место весьма значительное индуктивное падение напряжения.

Наличие этого индуктивного падения напряжения в обмотке якоря и является причиной того, что обыкновенная машина постоянного тока не может быть применена для работы от переменного тока. Индуктивное падение напряжения должно быть устранено любой ценой.

При решении этой весьма ответственной задачи мы убедимся, насколько важно иметь возможность компенсировать магнитный поток якоря коллекторной машины. Упомянутая в главе 73 компенсационная обмотка играет меньшую роль, так как она только облегчает работу обмотки возбуждения. Для коллекторных же однофазных моторов компенсационная обмотка является совершенно необходимой.

Для увеличения действия компенсационной обмотки коллекторные однофазные моторы выполняются с неявными полюсами. Железо статора, согласно рис. 178, полностью охватывает ротор, отчего воздушный зазор вдоль окружности якоря получается всюду одинаковым. Каждому пазу в якоре мы можем противопоставить соответствующий паз в статоре, а компенсационную обмотку выполнить в точности, как обмотку якоря. Если в компенсационную обмотку пустить ток в обратном направлении, то каждый проводник компенсационной обмотки и соответствующий проводник обмотки якоря (рис. 178) вступят во взаимное магнитное взаимодействие, результатом чего будет исчезновение магнитного потока якоря.

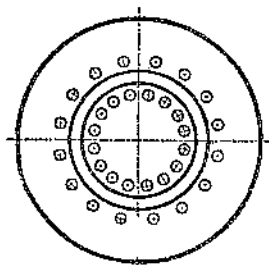


Рис. 178

Компенсационная обмотка является обмоткой постоянной и в то же время неподвижной относительно статора. Относительно этой обмотки текущая обмотка статора занимает всегда одно и то же положение, так как она оказывается неподвижной относительно статора, вследствие неподвижности самих щеток. Только по этой причине и становится возможной компенсация.

Статор с неявными полюсами должен, конечно, иметь еще обмотку возбуждения. Точно так же, как для синхронных машин с неявными полюсами, мы и в этом случае стремимся получить трапецеидальный магнитный поток, при чем мы занимаем под обмотку возбуждения две трети окружности статора. Для этого две трети общего количества пазов статора углубляются, что дает возможность поместить в них, кроме компенсационной обмотки, еще и обмотку возбуждения.

85. НАПРЯЖЕНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ И КОММУТАЦИЯ ТОКА.

До тех пор, пока щетки находятся в нейтральной зоне, напряжение трансформации, вызванное главным магнитным потоком, не имеет для нас значения, но оно, как всякое напряжение на витке, самым неблагоприятным образом отзывается на коммутации тока.

Проблема коммутации коллекторного однофазного мотора казалось бы разрешается уже тем, что мы не встречаем больше затруднений при коммутации машин постоянного тока. Можно было бы подумать, что для весьма коротких промежутков времени должна получиться уже известная нам из главы 75 картина коммутации. То обстоятельство, что токи по своей величине меняются каждое мгновение, нашу задачу ни в коей мере не осложняет. Дополнительные полюсы, возбуждаемые переменным

током якоря, легко могут дать в любой момент пужное напряжение коммутации.

Но тем не менее коммутация в однофазных коллекторных моторах намного сложнее, чем в машинах постоянного тока. Коротко-замкнутая секция, со всеми относящимися к ней проводниками, помещается в нейтральной зоне и пересекается главным магнитным потоком полностью. Наведенное в ней напряжение трансформации препятствует коммутации тока. Это весьма серьезное приходящее обстоятельство.

Мы не должны забывать, что напряжение вращения коротко-замкнутой секции находится в фазе с главным магнитным потоком, в то время как напряжение трансформации отстает от этого потока на 90° . Во время коммутации, следовательно, нужно иметь вспомогательный поток, который пересекался бы с проводниками указанной секции и опережал бы на 90° главный магнитный поток; тогда мы сможем устранить также и напряжение трансформации.

Наряду с обычным потоком коммутации, применяющимся в машине постоянного тока, необходимо иметь еще другой дополнительный поток. Но как поступить при пуске мотора? Ведь и неподвижный якорь обладает мешающим напряжением трансформации. В то время как якорь не пересекает еще никаких силовых линий, в коротко-замкнутой секции уже получается полное напряжение трансформации, угрожающее искрением на коллекторе при пуске.

Выхода, однако, нет. Напряжение трансформации можно было бы уничтожить, устранив главный магнитный поток, но без последнего нельзя получить пускового вращающегося момента. Это обстоятельство снова создает на пути разрешения проблемы коммутации невероятные трудности.

Поскольку мы знаем, что при пуске коллекторного однофазного мотора напряжение трансформации в коротко-замкнутой секции не устраняемо, т.е. поскольку теоретически не существует удовлетворительного решения этого вопроса, нам остаются только две возможности. Или же совершенно отказаться от коллектора при работе на переменном токе, или же решиться помириться с неизбежным и решиться пустить коллекторный мотор в том виде, как он есть, имея в виду, что впоследствии на полном ходу мотора напряжение трансформации будет устранено напряжением коммутации.

Но пренебречь коллекторным мотором переменного тока нельзя. Ведь этот мотор является самым подходящим мотором для железных дорог, когда почему-либо постоянный ток для этой цели оказывается непригодным. В то же время тяговые моторы должны пускаться при большой нагрузке. Они склонны к искрению, между тем как искрить они не должны.

Итак, напряжение коротко-замкнутой секции не должно вызывать искрения на щетках. Угольные щетки допускают напряжение 6 вольт в коротко-замкнутой цепи. Благодаря своему значительному переходному сопротивлению и еще большему сопротивлению, заключающемуся между коллекторными пластинками, угольные щетки не дают проявиться вредным последствиям напряжения трансформации, если только последнее не превосходит известного предела.

Это является хлопотливым, вызванным необходимостью решением вопроса. Но в то же время это единственный способ ограничить в достаточной степени величину напряжения трансформации коротко-замкнутой секции. Из этой меры вытекают важные ограничения при исполнении коллекторных моторов однофазного тока.

На коротко-замкнутую секцию полностью действует главный магнитный поток. Если секция имеет w витков, то в ней получается напряжение трансформации, равное

$$E_k = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot w \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ эффективных вольт.}$$

Чтобы уменьшить это напряжение до допустимой величины, мы уменьшаем прежде всего число витков. Теоретически мы можем положить $w=1$, т.е. каждый виток обмотки якоря снабдить коллекторной пластиной. Но в этом случае мы получим такое большое число пластин, что щетка должна будет перекрывать, по крайней мере, две пластины, в противном случае она будет недостаточно прочна в механическом отношении. Итак, нам остается только взять

$$w=2.$$

Далее важно уменьшить, насколько возможно, число периодов f_1 . После этого делается понятным, почему для железных дорог применяют $16 \frac{2}{3}$ периода в секунду. При этом для целей освещения можно воспользоваться теми же трансформаторами, взяв напряжение третьей гармонической, имеющей число периодов 50.

Из этих соображений мы получаем предельное число силовых линий главного магнитного потока

$$\Phi \leq = \frac{6 \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{10^8}{2 \cdot 16^{2/3}} = 4,10^6 \text{ силовых линий.}$$

Но электромашиностроение не терпит подобных ограничений. Оно не мирится с ограничением предела мощности коллекторных моторов переменного тока. Поэтому пришлось искать выхода из создавшегося положения; эти выходы были, действительно, найдены. На два из них мы здесь укажем.

Как показано на рис. 179, можно снабдить каждую половину витка коллекторной пластиной. При желании можно подразделить виток еще больше. В этом случае магнитный поток может получиться в несколько раз больше указанного выше предела.

Можно, как показано на рис. 180, ввести искусственное сопротивление в соединительные провода коллектора. Эти сопротивления помогают собственным сопротивлениям угольных щеток снижать ток в коротко-замкнутой цепи. При работе мотора эти сопротивления оказываются под током только тогда, когда их коснутся щетки. Но все же они снижают коэффициент полезного действия мотора.

Этими мероприятиями решается проблема коммутации при пуске в ход коллекторного мотора переменного тока; это не избавляет нас от необходимости во время стационарной работы мотора окончательно устранить напряжение трансформации при помощи добавочного напряжения коммутации.

Дополнительные полюсы, заимствованные в неизменном виде от машины постоянного тока, компенсируют только напряжение самоиндукции машины. Размеры таких добавочных полюсов определяются уравнением (28)

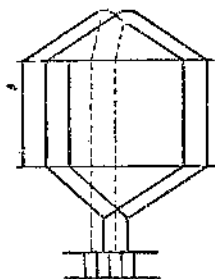


Рис. 179

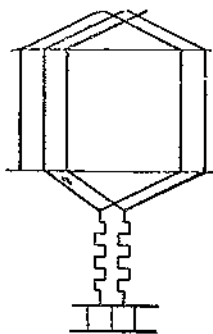


Рис. 180

главы 78; при линейной нагрузке якоря A (амп./см) они должны вызвать максимальную индукцию

$$R_{w \max} = \xi \cdot \sqrt{2} \cdot A \text{ гауссов.}$$

Поток коммутации должен быть всегда направлен против тока якоря. Он наводит тогда в проводниках коротко-замкнутой секции напряжение вращения, направленное противоположно превращаемому току.

Мы видим, что мотор нуждается еще в добавочном потоке коммутации. Было бы хорошо из дополнительных полюсов получать, помимо основного, еще добавочный поток коммутации. Это оказывается, действительно, возможным.

В последовательном коллекторном моторе переменного тока главный магнитный поток находится в фазе с током нагрузки I . Напряжение трансформации в коротко-замкнутой секции E_k отстает поэтому от тока нагрузки на 90° . Дополнительный поток коммутации Φ_g должен быть

направлен против этого напряжения, так, как вызванное им добавочное напряжение коммутации есть напряжение вращения. Основной поток коммутации Φ_w направлен, как сказано, против тока нагрузки.

При рис. 181 легко определить суммарный поток коммутации.

Для его возбуждения требуется только слагающая I_g тока нагрузки, находящаяся с ним в фазе или направленная ему навстречу, в зависимости от направления намотки добавочных полюсов.

Обмотка дополнительных полюсов обладает, главным образом, индуктивным сопротивлением. Если параллельно к ней присоединить соответствующее омическое сопротивление и пропустить ток нагрузки по обеим параллельным ветвям, то мы сможем разделить этот ток по желанию на I_g и I_r (рис. 181). Это остроумное решение имеет тот недостаток, что прохождение тока I_r вызывает потери в его сопротивлении.

36. ОДНОФАЗНЫЙ КОЛЛЕКТОРНЫЙ МОТОР ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ.

Область построения коллекторных моторов переменного тока по своим формам самая богатая во всем электромашиностроении. Различные варианты решенной проблемы коммутации тока при пуске в ход мотора видоизменяют общую картину; точно так же получение суммарного потока коммутации может происходить несколькими способами.

Для разрешения поставленной перед нами задачи — дать описание принципа действия электрических машин — достаточно показать лишь несколько возможных исполнений. В данной книге идет речь о сущности машин, но не о конструкции последних.

После того, как мы осветили ряд предварительных положений, главным образом, компенсирования потока якоря и коммутации тока, мы можем обратиться к рассмотрению основных форм коллекторных моторов переменного тока; при этом нам не придется сталкиваться с большими трудностями.

Как и при постоянном токе, тяговый коллекторный мотор переменного тока желательно иметь последовательного возбуждения. При этом

получается наибольший пусковой момент. В этом отношении мотор по стоянного тока и коллекторный переменного тока равноценны.

Для пускового момента, очевидно, чрезвычайно важно то обстоятельство, что при последовательном возбуждении главный магнитный поток совпадает по фазе с рабочим током якоря. Тем не менее при одинаковом максимальном значении числа силовых линий главного магнитного потока и одинаковом токе нагрузки мотор постоянного тока развивает больший момент вращения. В первом случае среднее значение вращающего момента равно

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} 2 I_w^2 \sin^2 \omega t$$

а в другом

$$I_{gi}^2,$$

при чем

$$\Phi = k \sqrt{2} \cdot I_w = k \cdot I_{gi}.$$

Вращающий момент при постоянном токе, следовательно, в $\sqrt{2}:1$ раз больше; машина постоянного тока может развить большую мощность, нежели произведенный от нее коллекторный мотор последовательного возбуждения.

Включение последовательного коллекторного мотора чрезвычайно просто. Рис. 182 показывает, что приходящий из сети ток нагрузки сначала поступает в якорь, затем обтекает компенсационную обмотку, дополнительные полюсы, помещенные в параллельной ветви (на рисунке не показано) и, наконец, обмотку возбуждения.

Приложенное напряжение должно преодолеть, помимо напряжения вращения якоря, еще многочисленные падения напряжения в сопротивлениях. Прежде всего, это омические падения напряжения в якоре, в компенсационной обмотке, в обмотке дополнительных полюсов и обмотке возбуждения. К этому нужно прибавить индуктивные падения напряжения, которыми пренебречь нельзя.

Компенсационная обмотка вполне справляется со своей задачей—компенсировать магнитный поток якоря. Но, несмотря на это, имеются еще силовые линии рассеяния, сцепленные только с проводниками якоря или только с проводниками компенсационной обмотки. Обмотка якоря и компенсационная обмотка обладают поэтому значительным индуктивным сопротивлением.

Тот факт, что обмотка дополнительных полюсов и обмотка возбуждения должны обладать значительным индуктивным сопротивлением, очевиден. Мы вправе даже ожидать, что суммарное индуктивное сопротивление преобладает над омическим падением напряжения.

При построении векторной диаграммы рис. 183 исходят из тока нагрузки I . В фазе с ним находится слагающая напряжения

$$I(K_a + K_n),$$

преодолевающая омическое падение напряжения; вторая слагающая $I(X_a + X_n)$, уравнивающая индуктивное падение напряжения, опережает ток на угол 90° . Наконец, обратное направление имеет напряжение

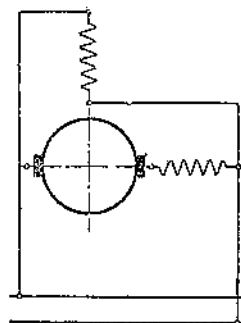


Рис. 182

вращения в якоре. Оно преодолевается третьей слагающей приложенного напряжения.

Итак, мы видим, что коэффициент мощности мотора тем хуже, чем меньше наведенное в якоре напряжение, т.-е. чем медленней последний вращается. У простого последовательного коллекторного мотора коэффициент мощности никогда не может достигнуть единицы.

Стремление улучшить коэффициент мощности заставляет уменьшать воздушный зазор, чтобы, по возможности, ограничить потоки рассеяния обмотки якоря и компенсационной обмотки. Параллельно с этим получается уменьшение магнитодвижущей силы возбуждения. В противоположность машинам постоянного тока здесь, при применении компенсации потока якоря, перевес магнитодвижущей силы возбуждения над магнитодвижущей силой якоря не только не нужен, но прямо вреден. Уменьшая число витков обмотки возбуждения мы тем самым уменьшаем индуктивное сопротивление этой обмотки.

Рис. 183

Таким путем удастся в конце концов превратить последовательный коллекторный мотор в удовлетворительно работающую машину. Этот мотор так же чувствителен к изменению числа оборотов, как и последовательный мотор постоянного тока. Это обстоятельство само по себе означает успех в развитии коллекторных моторов переменного тока. Однофазный асинхронный мотор плохо берет с места, имеет постоянное число оборотов и неудовлетворительный коэффициент мощности. Простой последовательный коллекторный мотор развивает большой пусковой момент, сам регулирует свое число оборотов и часто достигает очень хорошего коэффициента мощности.

Однофазный коллекторный мотор может, казалось бы, работать при шунтовом возбуждении. В этом случае он потреблял бы, кроме тока нагрузки якоря, еще некоторый ток возбуждения. Но внимательное изучение рис. 184 тотчас нас убеждает в том, что схема, просто заимствованная от мотора постоянного тока, в данном случае не подходит.

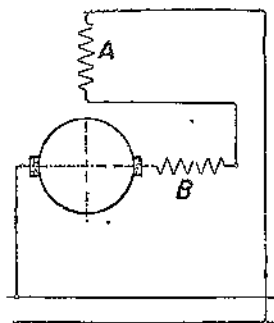


Рис. 184

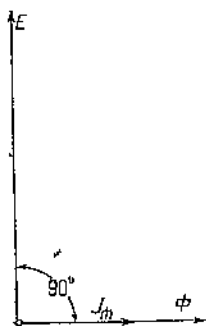


Рис. 185

Напряжение сети вызывает в шунтовой обмотке возбуждения ток, отстающий от этого напряжения почти на 90° (рис. 185). С этим током находится в фазе главный магнитный поток. Если поэтому нагрузочный ток якоря должен иметь небольшой угол сдвига фаз с напряжением сети, то он должен быть сдвинут по фазе с главным потоком почти на 90° . Но в этом случае машина не может развить никакого вращающего момента.

Тем обстоятельством, что для переменного тока годится лишь мотор постоянного тока с последовательным возбуждением, предопределяется весь дальнейший путь развития коллекторных моторов переменного тока. На первый взгляд кажется, что принцип работы этих моторов уже полностью исчерпан предшествовавшим изложением.

Но действительность говорит о другом. Необходимые преобразования, которые мы произвели для того, чтобы мотор постоянного тока мог работать от переменного тока, привели к ряду новых элементов в машине; таким прежде всего является компенсационная обмотка. Новым является также напряжение трансформации, неизвестное мотору постоянного тока. Совершенно очевидно, что нам представляется возможность новых комбинаций. Действительно, полная картина работы коллекторных моторов переменного тока необычайно сложна. Мы должны сделать попытку в этой картине разобраться.

87. КОЛЛЕКТОРНЫЙ МОТОР, КАК ДВОЙНОЙ ТРАНСФОРМАТОР.

У всякой коллекторной машины компенсационная обмотка преследует цель уничтожения потока якоря. Она способствует тому, что остается действовать только один главный магнитный поток, т.-е. поток обмотки возбуждения. Этим самым она как бы исключает коллекторную машину из числа машин, работающих по принципу всеобщего трансформатора.

При рассмотрении всех остальных машин мы имели случай убедиться, что рабочий поток создается сообщая первичной и вторичной обмоткам. Здесь же мы имеем случай, когда действует только одна первичная обмотка. Мы, казалось бы, в этой электрической машине имеем совершенно новый принцип действия.

Но этот вывод неверен. Идея трансформатора настолько всеобъемлюща, что, на самом деле, она в коллекторном моторе проявляется еще с большей силой. Компенсационная обмотка стирает характерную черту трансформатора, зато мы без труда можем вскрыть в одном коллекторном моторе существование одновременно двух трансформаторов.

Прежде всего, обмотка якоря и компенсационная обмотка, несомненно, образуют или, по крайней мере, могут образовать настоящий трансформатор. На схеме рис. 182 эти обмотки образуют бездействующий трансформатор, так как магнитодвижущие силы обеих обмоток в магнитном отношении полностью компенсируются. Но мы имеем определенную возможность использовать эти обмотки в качестве первичной и вторичной обмотки трансформатора. В дальнейшем мы попробуем провести это в жизнь.

Кроме того, обмотка возбуждения и обмотка якоря, в случае расположения щеток по оси магнитов, также образуют трансформатор переменного тока. В простейшей схеме рис. 182 этот трансформатор также оказывается бездействующим, так как на рабочих щетках не может появиться играющее роль вторичного напряжения трансформатора напряжение трансформации обмотки якоря.

Игра бы не стоила свеч, если бы мы ограничились тем, что обнаружили в одной машине существование одновременно двух трансформаторов и вслед за этим пришли бы к заключению, что оба трансформатора в действительности бездействуют. Но дело в том, что мы во всякий момент можем призвать их к действию. Поскольку они обнаружены, нужно их использовать. Не обнаружив их, мы бы не пришли к тому многообразию форм, которое существует в области построения коллекторных моторов, и не дошли бы до тех усовершенствований, которые в этом деле имеют место.

Насколько важно уметь различать в коллекторном моторе свойства трансформатора, говорит уже первая из разновидностей последовательного коллекторного мотора, изображенная на рис. 186. Она отличается от изображенного на рис. 182 мотора только тем, что обмотка якоря выделена

из главной цепи тока и коротко замкнута сама на себя. На эскизной схеме пропущена обмотка дополнительных полюсов. Последняя при меняется всегда, но простоты ради, в дальнейшем нами на схемах не показывается.

Коротко-замкнутая обмотка якоря репульсионного мотора Atkinson'a и Déri превратилась в коротко-замкнутую вторичную обмотку трансформатора тока, обмотками которого являются—обмотка якоря и компенсационная. До тех пор пока якорь неподвижен, на коротко-замкнутую обмотку действует магнитодвижущая сила, снижающая поток якоря до небольшой величины. Этот остаточный поток наводит в обмотке напряжение, достаточное только для преодоления сопротивлений в коротко-замкнутой цепи. С другой стороны, тот же поток наводит в компенсационной обмотке напряжение, очевидно, соответствующее вызванному в неподвижной обмотке якоря падению напряжения.

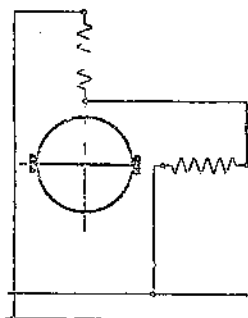


Рис. 186

Короткое замыкание обмотки якоря имеет то преимущество, что она при этом не должна обязательно иметь одинаковое с компенсационной обмоткой число проводников и одинаковый с последней ток. Ве магнитодвижущая сила, почти равная всей магнитодвижущей силе якоря, может быть составлена из тока произвольной силы и произвольного числа проводников. Большое сечение проводников и малое их число, небольшое напряжение, а, следовательно, дешевая изоляция—вот преимущества такой обмотки.

Можно также замкнуть накоротко и компенсационную обмотку, включив обмотку якоря в цепь главного тока. Казалось бы, что при этом мы получим тот же результат.

В коротко-замкнутой компенсационной обмотке имеет место только преодолевающее сопротивления напряжение. В коротко-замкнутой же обмотке якоря, когда машина вращается, получается, кроме того, наведенное главным потоком напряжение вращения, которое должно быть уравновешено наводимым поперечным потоком напряжением трансформации. Вращающийся репульсионный мотор должен, очевидно, иметь интенсивный поперечный поток. Этот поперечный поток, являющийся рабочим потоком трансформатора, состоящего из компенсационной обмотки и обмотки якоря наводит, конечно, в компенсационной обмотке напряжение вращения; при этом мы предполагаем, что с обеих сторон имеется одинаковое число проводников. В результате получается, что напряжение вращения якоря косвенным образом проявляется в цепи главного тока так же, как в случае простого последовательного коллекторного мотора; то же самое, очевидно, относится и к падению напряжения в обмотке якоря.

В высшей степени замечательно, что компенсационная обмотка преследует свою особую цель. Она создает сильный поперечный поток, т.е. собственно говоря, обращенный поток якоря. Этот поперечный поток получается такой же силы, как поток якоря. Действительно, если наведенное главным потоком напряжение вращения должно уравновешивать наведенное обмоткой якоря напряжение трансформации, то, согласно уравнений (29) и (30) и требования соблюдения синхронизма

$$f_2 = f_1$$

оба потока—главный и поперечный—должны быть, на самом деле равны.

38. ТЕОРИЯ МОТОРА ATKINSON'A-DÉRI.

Приведением в действие трансформатора, состоящего из компенсационной обмотки и обмотки якоря посредством короткого замыкания щеток якоря, помещенных в нейтральной зоне, достигается не только независимость в выполнении обмотки якоря. Схема включения Atkinson'a-Déri более ценна, чем это может показаться на первый взгляд. Обозначим через:

- Φ_h — главный магнитный поток,
- Φ_q — поперечный поток,
- f_1 — периодичность внешней цепи,
- f_2 — периодичность в цепи якоря.

Периодичность f_2 , как обычно, зависит от числа полюсов p и числа оборотов в минуту мотора n ; согласно уравнений (29) и (30) для достижения электрического равновесия появляющихся между лежащими на нейтральной оси щетками напряжением вращения и трансформации — должно быть соблюдено нижеследующее условие

$$\Phi_h \cdot f_2 = \Phi_q \cdot f_1$$

При синхронизме

$$f_1 = f_2,$$

поэтому

$$\Phi_h = \Phi_q.$$

Но это еще не все. Равновесие напряжений в якоре нуждается в сдвиге фаз на 90° между главным магнитным потоком и поперечным потоком. Всякое напряжение вращения находится в фазе с наводящим это напряжение потоком; напряжение же трансформации отстает на 90° от вызвавшего его потока. Оба потока равны, имеют одинаковую периодичность; но эти потоки не только во времени, но и в пространстве сдвинуты между собой на 90 электрических градусов. Ось щеток перпендикулярна оси полюсов и является одновременно осью поперечного потока.

Главный и поперечный потоки образуют поэтому при синхронизме вращающийся поток, согласно главе 25. То, что с трудом, при помощи вспомогательной обмотки в статоре достигается у однофазного асинхронного мотора, у мотора Atkinson'a получается само собой.

Особый интерес имеет еще тот факт, что мотор Atkinson'a при синхронизме не нуждается в добавочном потоке коммутации. Его дополнительным полюсам приходится заботиться только о напряжении самоиндукции, возникающем при коммутации.

Чтобы это доказать, обратимся снова к рассмотрению явлений в коротко-замкнутой секции. Ее проводники расположены в нейтральной зоне и пересекают только силовые линии поперечного потока. В секции, как всегда, будет наводиться напряжение трансформации, вызванное главным потоком и пропорциональное произведению

$$\Phi_h \cdot f_1.$$

К этому присоединяется еще напряжение вращения, наводимое поперечным потоком. Последнее пропорционально, очевидно, поперечному потоку и скорости пересечения силовых линий, т.-е. числу периодов в обмотке якоря.

Формулы (29) и (30) говорят об аналогии при образовании напряжения вращения и напряжения трансформации. В рассматриваемой секции напряжение трансформации и напряжение вращения относятся между собой, как

$$\Phi_h \cdot f_1 : \Phi_a \cdot f_2.$$

Теперь становится ясно, что, вследствие равенства при синхронизме главного и поперечного потоков в секции, должны быть равны также и оба вредных напряжения. Но они направлены противоположно друг другу. Равновесие напряжений в коротко-замкнутом якоре имеет последствием, как легко видеть, равенство напряжений в коротко-замкнутой секции, хотя при этом потоки меняются ролями.

Вне синхронизма это необходимое для коммутации равновесие нарушается, и мы имеем остаток напряжения, пропорциональный

$$\Phi_h \cdot f_1 - \Phi_a \cdot f_2.$$

Но, как было выше указано, всегда должно быть соблюдено равенство

$$\Phi_h \cdot f_2 = \Phi_a \cdot f_1.$$

Остаток напряжения возрастает поэтому пропорционально выражению

$$\Phi_h \cdot \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1}.$$

При пуске будем иметь

$$f_2 = 0$$

и напряжение трансформации будет, к сожалению, оказывать полностью свое мешающее действие при коммутации.

Приведение при помощи закорачивания обмотки якоря в действие трансформатора, состоящего из компенсационной обмотки и обмотки якоря, дает большие преимущества, особенно при синхронизме. Вне синхронизма приходится, однако, заботиться о том, чтобы некоторый добавочный поток улучшал коммутацию.

Но и вне синхронизма поперечный поток оказывает нам существенную поддержку.

Легко убедиться в том, что приведение в действие трансформатора, состоящего из обмотки якоря и компенсационной обмотки, дает больше преимуществ при замыкании накоротко обмотки якоря, нежели при замыкании компенсационной обмотки. Но все описанные модификации ни в коей мере не изменяют основных свойств обыкновенного последовательного мотора. При любой схеме приложенное напряжение должно преодолевать, кроме омического и индуктивного падения напряжения, еще наводимое главным потоком напряжение вращения обмотки якоря. Векторная диаграмма рис. 183 остается справедливой во всех случаях.

Для достижения удовлетворительного коэффициента мощности мотор Atkinson'a должен быть построен на большое число оборотов. Если не считать этого ограничения, справедливого по отношению к любому последовательному мотору, в остальном мы в отношении выбора числа оборотов свободны. Компенсация сдвига фаз, коэффициент мощности, равный единице, недостижимы, конечно, в моторе Atkinson'a.

89. МОТОР WINTER-EICHBERG-LATOUR'A.

В предыдущей главе мы занимались только одним из составляющих последовательный мотор трансформаторов, а именно трансформатором,

состоящим из обмотки якоря и компенсационной обмотки. Полученные при этом несомненные преимущества, навели на мысль привести в действие также другой трансформатор, состоящий из обмотки возбуждения и обмотки якоря.

Нормально обмотка возбуждения, играющая роль первичной обмотки, и вторичная обмотка до сих пор бездействовали, так как находившиеся в нейтральной зоне щетки включали эти обмотки таким образом, что наводимое на них напряжение не проявлялось.

Если мы наложим на коллектор щетки также и по направлению оси возбуждения, то мы сможем получить во внешней цепи полную величину напряжения холостого хода. Эти щетки являются своеобразными вторичными зажимами трансформатора, состоящего из обмотки возбуждения и обмотки якоря.

Нетрудно убедиться в том, что этот второй трансформатор последовательного мотора требует иного обращения, чем трансформатор, состоящий из обмотки якоря и компенсационной обмотки. Его магнитным потоком является основной магнитный поток машины, который, в противоположность поперечному потоку, не должен ослабляться. Поэтому не нужно замыкать на коротко через щетки ни обмотки возбуждения ни обмотки якоря.

Трансформатор, состоящий из обмотки якоря и компенсационной обмотки, представляет собой настоящий трансформатор тока, в соответствии с чем и надлежит с ним обращаться. Трансформатор же, состоящий из обмотки возбуждения и обмотки якоря, сохраняет величину своего потока. Он поэтому является трансформатором напряжения, более того, трансформатором напряжения, работающим вхолостую.

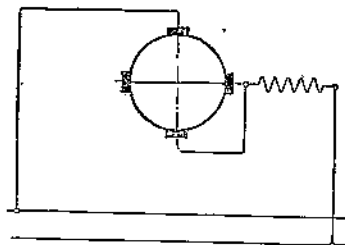


Рис. 187

Прежде чем приступить к изложению того, как использовать трансформатор, состоящий из обмотки возбуждения и обмотки якоря, необходимо установить, из чего мы будем при этом исходить. Для этого мы могли бы опять воспользоваться схемой рис. 182. Но лучше воспользоваться уже достигнутыми результатами. Поэтому мы будем исходить из мотора.

На первый взгляд кажется, что предпринять что-либо большее нельзя. Всякая нагрузка обмотки возбуждения оказалась бы вредной. Но можно обмотки поменять ролями; можно присоединить обмотку возбуждения к своим щеткам так, чтобы образованная последними текущая обмотка якоря стала первичной обмоткой.

Эта идея приводит тотчас же к неожиданным результатам. Собственно обмотка возбуждения становится излишней, так как она должна бы остаться ненагруженной, а ее напряжение неиспользованным; подобное явление мы имели раньше, когда мы упразднили щетки возбуждения поставив в стороне напряжение трансформации якоря. В результате мы получим простейшую схему рис. 187.

Эта схема знаменует собой одно из самых больших достижений в области построения коллекторных машин. Она значительно улучшает репульсионный мотор.

Преимущество этого мотора над своим предшественником заключается не в том, что отпадает обмотка возбуждения. Мотор Winter-Eichberg-Latour'a преследует совершенно новую задачу — компенсирование

сдвига фаз. Каким образом эта становится возможным, мы покажем в следующей главе. Здесь же мы должны разобрать еще один предварительный вопрос.

Щетки возбуждения, как и рабочие щетки, разделяют обмотку якоря на две текущих обмотки. По этим щеткам рабочий ток протекает через якорь, а после попадает в компенсационную обмотку. По рабочим щеткам протекает, кроме того, ток короткого замыкания якоря, который, если пренебречь намагничивающим током трансформатора (компенсационная обмотка — обмотка якоря), направлен противоположно рабочему току. В результате получим распределение токов, изображенное на рис. 188.

Обмотка якоря разбивается, очевидно, на четыре части, каждая из которых содержит омическое сопротивление R . В двух частях якоря протекает сумма $\frac{I}{2}$ и $\frac{I_k}{2}$, в других двух частях — разность этих токов. Суммарные тепловые потери можно выразить следующим образом

$$2R \left[\left(\frac{I + I_k}{2} \right)^2 + \left(\frac{I - I_k}{2} \right)^2 \right] = R(I^2 + I_k^2).$$

Один только рабочий ток вызвал бы потери

$$2 \cdot 2R \cdot \left(\frac{I}{2} \right)^2 = R \cdot I^2,$$

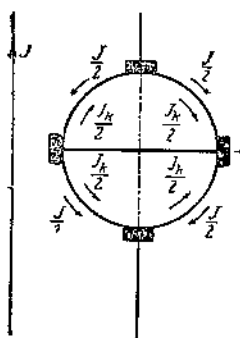


Рис. 188

а один ток короткого замыкания — $R I_k^2$. Следовательно, суммарные тепловые потери состояются из отдельных частей таким образом, как будто бы каждый ток имеет свою собственную обмотку якоря. Из этого мы заключаем, что оба тока не компенсируются взаимно в якоре.

Собственно говоря, тепловые потери выделяются только в одной половине якоря. Но именно поэтому в якоре имеет место одностороннее нагревание. Сущность текущих обмоток заключается в непрерывной смене проводников отдельных текущих обмоток. Каждый проводник по очереди обходит все четыре части якоря.

Подобно тому, как тепловые потери обоих токов якоря развиваются совершенно самостоятельно, так и образование омического падения напряжения от обоих токов идет независимо друг от друга. Это относится также и к индуктивному падению напряжения. Из сказанного можно было бы сделать вывод, что мотор W - E - L является лишь вариантом мотора Atkinson'a. Векторную диаграмму рис. 183 можно было бы применить и к мотору W - E - L . Но этот вывод неверен. В моторе W - E - L мы можем наблюдать совершенно новое явление.

90. ТЕОРИЯ МОТОРА W - E - L .

Добавление щеток возбуждения к мотору Atkinson'a имеет своей задачей не только создание возбуждения в якоре. В этом, в конце концов, не было бы никакого достижения. Правда, это, казалось бы, должно было привести к экономии меди на возбуждение. Но, как мы видели, тепловые потери в якоре увеличились ровно на величину тепловых потерь, которые должны были бы иметь место в обмотке возбуждения. Поэтому сечение обмотки якоря должно быть усилено; в результате мы

имеем просто перенесение меди, необходимой для возбуждения, в обмотку якоря.

Чрезвычайной важности фактом является появление на щетках возбуждения наводимого поперечным потоком напряжения вращения. По отношению к поперечному потоку щетки возбуждения находятся, очевидно в нейтральной зоне.

Напряжение вращения поперечного потока находится в фазе с поперечным потоком. С другой стороны, мы знаем, что поперечный поток сдвинут по фазе на 90° по отношению к главному потоку, находящемуся, в свою очередь, в фазе с током возбуждения. В цепи рабочего тока появляется, следовательно, напряжение, опережающее ток на 90° это напряжение дает возможность компенсировать действие индуктивного падения напряжения и получить ток возбуждения совпадающим по фазе с напряжением цепи.

При составлении точной векторной диаграммы мотора W.-E.-L. мы должны опять исходить из вектора тока возбуждения I , притекающего из сети по щеткам возбуждения через обмотку якоря, а затем проходящего через компенсационную обмотку. В фазе с I находится вектор главного магнитного потока Φ_h . Наведенное в якоре этим потоком напряжение вращения E_{abh} также находится в фазе с током возбуждения. Напряжение E_{abh} , а также омическое падение напряжения $I_a R_a$ и индуктивное падение напряжения $I_a X_a$ в коротко-замкнутой обмотке якоря должны компенсироваться напряжением трансформации поперечного потока E_{arg} .

Не трудно определить, какой величины должен получиться ток в коротко-замкнутой цепи якоря. Он должен давать всегда некоторый перевес магнитодвижущей силе компенсационной обмотки, чтобы мог образоваться необходимый для создания электрического равновесия в коротко-замкнутой цепи якоря поперечный поток Φ_a . Не трудно видеть, что Φ_a должен отставать почти на 90° от главного потока и, как известно, должен получиться почти равной последнему интенсивности. Напряжение вращения E_{abh} значительно превышает падение напряжения.

В результате, считая число проводников в якоре и компенсационной обмотке одинаковым, мы можем определить вектор тока и поперечный поток Φ_a . Этими величинами характеризуется трансформатор, состоящий из обмотки якоря и компенсационной обмотки.

Напряжение этого трансформатора E_{arg} при одинаковом числе проводников в первичной и вторичной его обмотке может быть представлено в виде некоторого падения напряжения в цепи тока возбуждения. Оно направлено почти противоположно току возбуждения I и содержит в себе уже омическое и индуктивное падение напряжения, заключающееся в замкнутой накоротко рабочими щетками цепи обмотки якоря.

Против тока возбуждения направлено также напряжение $I R_a$, преодолевать которое приходится протекающему через щетки возбуждения току; напряжение, при помощи которого обмотка якоря, как первичная обмотка трансформатора, образованного обмоткой якоря и компенсационной обмоткой, противодействует приложенному напряжению, отстает от тока возбуждения на 90° . Этим напряжением, очевидно, оказывается напряжение трансформации главного потока E_{ahh} . В цепи тока возбуждения участвует, наконец, и напряжение вращения поперечного потока E_{arg} .

находящееся в фазе с поперечным потоком. Требуется еще, однако, определить, каким образом E_{abq} включается в цепь рабочего тока.

Легко убедиться, что пространственный угол сдвига фаз между главным магнитным потоком и поперечным потоком, считая по направлению вращения якоря, зависит исключительно от способа соединения отдельных обмоток. Всегда есть возможность сделать так, чтобы по отношению к приложенному напряжению, E_{abq} играло роль, так сказать, напряжения на конденсаторе. Поэтому вектор напряжения E_{abq} может быть изображен именно так, как показано на рис. 189.

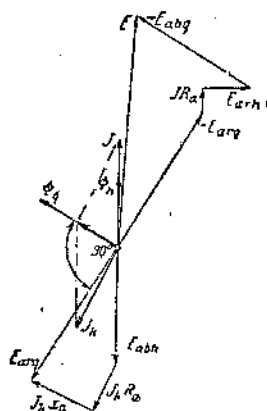


Рис. 189

Как вытекает из предыдущего, напряжение вращения поперечного потока E_{abq} должно быть несколько больше напряжения трансформации главного потока E_{abq} ; покрывающего преобладающее в цепи рабочего тока индуктивное падение напряжения; это требование вытекает из необходимости достижения полной компенсации сдвига фаз; пользуясь уравнениями (29) и (30), указанное условие может быть выражено следующим образом

$$\Phi_q \cdot f_2 \geq \Phi_k \cdot f_1.$$

Мы снова имеем перед собой уже знакомую картину (см. главы 87 и 88) и можем опять сделать вывод, что при синхронизме добавочный поток коммутации является излишним. Родственность мотора W.-E.-L. с мотором Atkinson'a склавывается и на этой детали.

Мотор W.-E.-L. в своей окончательной форме является еще в большей степени трансформатором, чем мотор Atkinson'a. Согласно рис. 190, мотор, обычно, имеет собственный регулирующий трансформатор тока, ко вторичным клеммам которого приключаются щетки возбуждения.

Нетрудно установить, что приключение трансформатора тока не вносит существенного изменения в принцип действия машины. В цепи рабочего тока на первичной стороне напряжение на щетках возбуждения воспринимается нами, как неизменяющееся.

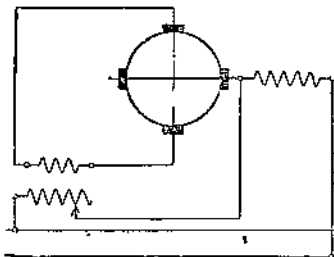


Рис. 190

Новое, связанное с появлением трансформатора, заключается в регулируемости главного магнитного потока. Дело в том, что мы никогда не должны забывать об одном слабом месте, всегда присущем коллекторным моторам переменного тока, а именно, что пуск их всегда сопряжен с опасностью искрения на коллекторе. В виду этого, мы в главе 85 установили даже предел для величины главного потока. Поэтому, если теперь мы имеем возможность при помощи регулирующегося трансформатора тока изменять величину магнитного потока, то этим самым мы достигаем весьма существенного улучшения коммутирования тока при пуске.

Напряжение трансформации в коротко-замкнутой секции может быть снижено уменьшением числа силовых линий главного магнитного потока. Но из-за этого не должен страдать вращающий момент мотора. Последний, как известно, зависит от величины произведения главного магнитного

потока на ток короткого замыкания в якоре I_d . То, что теряется при ослаблении потока, может быть скомпенсировано усилением тока короткого замыкания I_d . Коммутирование не зависит от величины тока, так как возбуждение дополнительных полюсов само собой устанавливается пропорционально величине коммутируемого тока. Пуск мотора W.-E.-L. осуществляется значительно легче, чем пуск других последовательных моторов.

91. ДЕТАЛИ ИСПОЛНЕНИЯ МОТОРА W.-E.-L.

Мотор W.-E.-L. обладает отличными качествами, и трудно зачастую сказать, что более ценно, компенсирование ли угла сдвига фаз или улучшение коммутирования тока при пуске. Но необходимо призадуматься еще над одним вопросом. Дело в том, что щетки возбуждения также нуждаются в коммутировании тока. Приходится коммутировать не только рабочий ток в коротко-замкнутой цепи якоря, но и ток, забираемый из сети через щетки возбуждения. Мы уже видели, что, если пренебречь падением напряжения на напряжение вращения главного магнитного потока должно компенсироваться напряжением трансформации поперечного потока. С другой стороны мы знаем, что напряжение вращения поперечного потока должно находиться в равновесии с напряжением трансформации, вызванным главным магнитным потоком. Это дает нам уверенность в том, что при синхронизме в коротко-замкнутой секции под рабочими щетками и под щетками возбуждения не будут получаться добавочные вредные напряжения. Обе пары щеток находятся в совершенно одинаковом положении.

При пуске, очевидно, для щеток возбуждения поперечный поток является опасным в такой же мере, как главный поток для рабочих щеток. Поэтому при пуске недостаточно при помощи трансформатора тока облегчить коммутирование тока только у рабочих щеток; нам необходимо позаботиться и о щетках возбуждения.

Но более внимательное изучение явлений при пуске мотора убеждает нас в том, что такая забота является излишней. Неподвижный мотор не имеет никаких напряжений вращения; следовательно, компенсирующая обмотка при пуске должна преодолевать только падения напряжения в коротко-замкнутом через рабочие щетки якоре. Трансформатор тока, состоящий из обмотки якоря и компенсирующей обмотки, согласно главы 87, нуждается в весьма слабом магнитном потоке. Следовательно, для коммутирования тока поперечный поток далеко не имеет такого значения, как главный магнитный поток.

Но этим самым решается в окончательном виде вопрос о коммутировании тока в моторе W.-E.-L. Само собой разумеется, что подобно тому, как это было в моторе Atkinson'a, вне синхронизма для обеих пар щеток необходимо иметь добавочный коммутирующий поток.

Если присмотреться еще раз к векторной диаграмме рис. 189, и принять при этом во внимание равенство при синхронизме главного и поперечного потоков, то нетрудно убедиться в том, что магнито-движущая сила якоря, приключенного к щеткам возбуждения, должна быть равна приблизительно сумме магнитодвижущих сил компенсирующей обмотки и замкнутой накоротко через рабочие щетки обмотки якоря. Мотор не имеет выступающих полюсов, поэтому в нем во всех радиальных направлениях магнитное сопротивление постоянно.

При одинаковом числе проводников в якоре и в компенсирующей обмотке магнитодвижущая сила якоря должна быть равна магнитодвижущей силе компенсирующей обмотки. Это вызвало бы весьма большой

ток возбуждения поперечного потока (рис. 189), и угол сдвига фаз между током в коротко-замкнутой цепи якоря и током возбуждения сильно отличался бы от 180° ; точно так же и угол сдвига фаз между поперечным потоком и главным не равнялся бы больше 90° .

Если компенсирующая обмотка будет содержать значительно большее число проводников, чем обмотка якоря, то картина изменится к лучшему. Можно, кроме того, прибегнуть к помощи трансформатора тока, вторичная обмотка которого питает щетки возбуждения. Последнее дает нам представление об имеющихся в нашем распоряжении конструктивных возможностях. Во всяком случае, легко установить, что нормально ток в коротко-замкнутой цепи якоря должен быть значительно сильнее, чем ток возбуждения; компенсирующая обмотка, а вместе с тем и рабочая обмотка якоря, должна обладать значительно большей магнитодвижущей силой, чем обмотка возбуждения. В моторах постоянного тока мы имели обратное соотношение этих величин.

Мы уже теперь можем утверждать, что трансформация тока возбуждения имеет исключительное значение. Она может быть использована и для других целей, прежде всего для регулирования скорости вращения при работе мотора.

Зададимся некоторым передаточным числом регулировочного трансформатора. Приходящий из сети ток обтекает компенсирующую обмотку и преобразовывается в трансформаторе в ток возбуждения I_e . Последний в свою очередь, определяет величину главного магнитного потока Φ_n .

После наступления в коротко-замкнутой цепи рабочих щеток электрического равновесия напряжений, согласно векторной диаграммы рис. 189, последнее может быть нарушено изменением передаточного числа при постоянном токе нагрузки I . Всякое изменение передаточного числа меняет величину тока возбуждения, а, следовательно, и величину главного магнитного потока Φ_n , что, в свою очередь отражается на напряжении вращения на рабочих щетках.

Но нарушенное электрическое равновесие должно восстановиться снова. Число оборотов якоря приспособливается к изменившимся условиям. По существу, мы получаем то же самое явление, как в моторе постоянного тока, у которого магнитный поток мы изменили при помощи шунтового регулятора.

В силу вышеизложенного, возбуждение мотора W.-E.-L. при помощи особого регулирующегося трансформатора означает большое достижение. Машина и регулирующий трансформатор представляют собой одно целое. Легко видеть, что в получившейся машине мы имеем замечательный своеобразный трансформатор, содержащий две последовательных первичных обмотки, но во вторичной цепи работающий на две отдельных цепи тока. Следовательно и последовательный мотор является подлинным трансформатором.

92. РАСЩЕПЛЕНИЕ ЩЕТКИ МОТОРА W.-E.-L. ДВОЙНОЕ ПИТАНИЕ.

Предыдущее изложение дает нам представление о том богатстве идей и возможностей, которыми располагает построение коллекторных моторов переменного тока; но мы задавались целью уяснить себе только принцип действия коллекторных моторов и не имели возможность заниматься разбором большого количества форм. Но многое тем не менее достойно упоминания. Здесь мы дадим несколько штрихов для полноты картины.

Latour весьма остроумно усовершенствовал мотор W.-E.-L., замкну якорь при помощи четырех, вместо двух, рабочих щеток (рис. 191). Легко видеть, что этим нововведением якорь в поясах 11^1 — 22^1 (рис. 191) освобождается от тока короткого замыкания. Магнитодвижущая сила замкнутого таким способом якоря возбуждает магнитный поток трапециевидальной формы, а не треугольной, как это было раньше.

Теперь на окружности статора в местах, соответствующих на якорь этим поясам и свободных, следовательно, от тока короткого замыкания можно с успехом не встраивать компенсирующей обмотки. Поперечный поток примет тогда трапециевидальную форму, практически играющую роль синусоидальной.

Вспомним, что напряжение вращения не зависит от формы кривой магнитного потока, а напряжение трансформации, наоборот, от нее зависит. Важно, чтобы и главный магнитный поток и поперечный поток — оба имели синусоидальную форму. Оставление свободной части окружности статора около нейтральной зоны имеет еще одно практическое значение. Мы получаем место для обмотки добавочного полюса, а также имеем при этом возможность выполнить самый добавочный полюс в виде зуба на статоре.

Latour присоединяет цепь тока возбуждения просто к обоим соединительным проводам, замыкающим накоротко щетки (рис. 191). Этим достигается то, что магнитодвижущая сила сосредоточивается в поясах якоря 11^1 — 22^1 рис. 191.

В результате и главный магнитный поток приобретает трапециевидальную форму, вместо первоначальной формы треугольника. Магнитодвижущая сила возбуждения будет при этом значительно лучше использована. Максимальная плотность главного магнитного потока теперь имеет место не только в одной единственной точке на окружности якоря, но распределяется по значительной дуге этой окружности.

Весьма интересно упрощение регуляционного мотора Atkinson'a, предложенного Thomson'ом. Мотор Atkinson'a, согласно главы 87, имеет в статоре две сдвинутых на 90 электрических градусов обмотки, — компенсирующую и обмотку якоря. Легко понять, что мы можем заменить эти обмотки одной, при условии, что магнитное действие последней будет эквивалентно одновременному магнитному действию обеих обмоток.

Так получилась схема рис. 192, содержащая в статоре всего одну обмотку. В соответствии с этим замыкающие накоротко щетки не находятся уже больше, конечно, в нейтральной зоне. Они должны быть расположены в действительной нейтральной зоне главного магнитного потока.

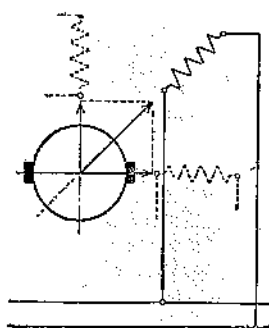


Рис. 192

При любом положении щеток суммарный магнитный поток обмотки статора мотора Thomson'a, согласно рис. 192, может быть всегда разложен по направлению щеток и перпендикулярно к ним. Перпендикулярная составляющая представляет собой всегда главный магнитный поток. В виду этого в моторе Thomson'a регулировка достигается простым передвижением щеток.

Наконец, нужно еще указать на возможность получения также и шунтового мотора переменного тока, что мы в главе 86 признали невозможным:

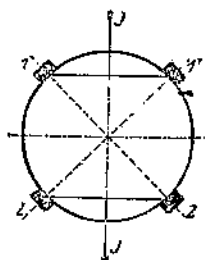


Рис. 191

правда, мы получаем его в несколько иной форме, — из последовательного мотора переменного тока.

В моторе W.-E.-L., независимо от того, снабжен ли он вспомогательным трансформатором, или нет, обмотка возбуждения включается последовательно с компенсирующей. Если, ничего не меняя в исполнении мотора, включить обмотку возбуждения и компенсационную обмотку (рис. 193) параллельно, то мы получим шунтовой мотор переменного тока.

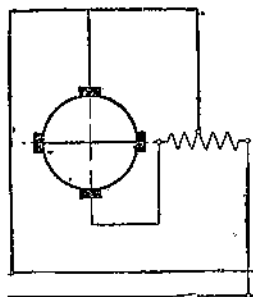


Рис. 193

Но шунтовой мотор далеко не играет той роли, как последовательный. Легко убедиться, что для получения напряжения самонадукции в обмотке возбуждения, образуемой щетками возбуждения, и создания главного магнитного потока, необходимо сперва иметь напряжение вращения поперечного потока. Шунтовой мотор не может самостоятельно развернуться. Пришлось для этой цели дать специальную пусковую обмотку. Шунтовой мотор пускается как мотор W.-E.-L. или же как мотор Atkinson'a.

В противоположность моторам постоянного тока для коллекторных моторов переменного тока, вообще говоря, предпочтительней последовательное возбуждение. В предшествовавшем изложении мы убедились, что шунтовой мотор постоянного тока в неизменном виде не годится для работы на переменном токе, и что мотор W.-E.-L. работая, как шунтовой, страдает большими недостатками.

Для того, чтобы мотор постоянного тока мог работать на переменном токе, пришлось внести в него коренные изменения. В своей окончательной форме он стал совсем не тем, чем был, развившись в совершенно новую машину по мере усовершенствования коммутирования тока. Но тем не менее этот мотор еще не обрел своей окончательной формы.

Об этом говорит тот заслуживающий внимание факт, что мы можем отойти от мотора постоянного тока еще дальше, чем это сделано в моторе W.-E.-L. возбуждение которого регулируется при помощи особого трансформатора. Можно, например, при помощи регулировочного трансформатора подводить часть напряжения сети (рис. 194) к компенсирующей обмотке, а другую часть к обмотке якоря, т.е. можно получить мотор с двойным питанием.

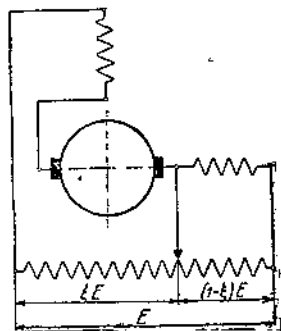


Рис. 194

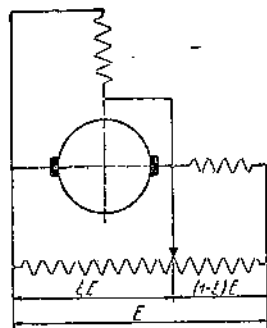


Рис. 195

Коллекторные моторы переменного тока могут быть последовательного (рис. 194) или же шунтового (рис. 195) возбуждения. В обоих случаях имеется возможность произвольно изменять величину поперечного потока при помощи деления трансформатором напряжения сети. К образуемой рабочими щетками обмотке якоря со стороны сети приложено некоторое напряжение ξE (рис. 195), уравнивающее наводимое в обмотке напряжение. Здесь приходится иметь дело не только с одним напряжением вращения, наводимым главным магнитным потоком. Кроме этого

нужно учесть еще второе приложенное к компенсирующей обмотке напряжение $(1 - \xi) E$ (рис. 195), действующее в трансформаторе, состоящем из компенсирующей обмотки и обмотки якоря.

Пренебрегая падением напряжения, получим напряжение вращения главного магнитного потока Φ_h равным

$$E_{bh} = k \cdot f_2 \cdot \Phi_h;$$

напряжением же трансформации поперечного потока, при условии равенства проводников в якоре и в статоре, будет равно

$$E_{rq} = E(1 - \xi) = k \cdot f_1 \cdot \Phi_q.$$

При правильном включении должно быть

$$k \cdot f_2 \cdot \Phi_h - k \cdot f_1 \cdot \Phi_q = \xi E.$$

Следует заметить, что указанное равновесие будет иметь место лишь в том случае, когда Φ_h и Φ_q во времени и в пространстве будут сдвинуты между собой на угол 90° , так как здесь идет речь о напряжении вращения и напряжении трансформации.

Условие равновесия напряжений можно выразить более упрощенно следующим образом

$$k \cdot f_2 \cdot \Phi_h = E.$$

Наведенное поперечным потоком напряжение вращения на щетках возбуждения примет следующее значение

$$E_{bq} = k \cdot f_2' \cdot \Phi_q.$$

Одновременно с этим мы будем иметь напряжение трансформации главного магнитного потока

$$E_{rh} = k \cdot f_1 \cdot \Phi_h.$$

Если в цепи возбуждения должно быть соблюдено равновесие, то

$$k \cdot f_2 \cdot \Phi_q - k \cdot f_1 \cdot \Phi_h = 0.$$

В результате мы получаем условие электрического равновесия на обеих парах щеток в следующем общем виде

$$f_2 = \frac{f_1}{\sqrt{1 - \xi}}$$

откуда мы видим, что число оборотов устанавливается при помощи трансформатора.

Векторная диаграмма рис. 196 шунтового мотора с двойным питанием ясно показывает, какую роль играет регулировка величины поперечного потока.

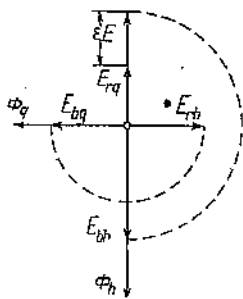


Рис. 196

95. КОЛЛЕКТОРНЫЙ МОТОР ТРЕХФАЗНОГО ТОКА.

Роторы асинхронных моторов трехфазного тока почти всегда снабжаются замкнутой обмоткой постоянного тока. Трехфазная обмотка ротора при помощи контактных колец включается, обыкновенно, в треугольник; угол ее, как всякой двухслойной обмотки, равен 120° .

Мы можем сделать еще один шаг вперед. Снабдим асинхронный мотор настоящим якорем машины постоянного тока, обмотка которого

будет, конечно, соответствовать числу полюсов на статоре; вместе с якорем мы строим и коллектор. На сей раз щетки по коллектору разместим под углом 120° друг к другу. Для каждой фазы или, лучше сказать, для каждой вершины треугольника обмотки ротора мы будем иметь по одной щетке.

Казалось бы, мало что изменилось. Вместо контактных колец, мы имеем сейчас присоединения в виде щеток на коллекторе. В месте подвижной, постоянной и включенной в треугольник обмотки якоря, мы имеем теперь текучую, неподвижную относительно статора, попрежнему трехфазную и включенную в треугольник обмотку ротора. В результате мы получили коллекторный мотор трехфазного тока.

Лучше всего изучить сперва холостую работу коллекторного мотора трехфазного тока, исключив при этом из рассмотрения потери. В этом случае в роторе мотора тока нет, так как он не развивает никакого вращающего момента; положение щеток на коллекторе роли не играет, так в силу сделанных нами допущений мотор продолжает оставаться асинхронным мотором трехфазного тока, у которого при синхронизме в роторе напряжения образоваться не могут.

Но мы можем непосредственно или же при помощи регулировочного трансформатора к щеткам ротора приложить напряжение сети, питая одновременно и статор и ротор; посмотрим, что при этом получится (рис. 197).

Обыкновенный асинхронный мотор нельзя одновременно питать со стороны статора и ротора. Три постоянных, одновременно с ротором вращающихся фазных обмотки под внешним воздействием образовали бы вращающийся поток,

который вращался бы относительно возбуждавшей его обмотки ротора со скоростью, пропорциональной числу периодов приложенного напряжения. Поток статора и поток ротора не находились бы в покое друг относительно друга, а потому не могли бы образовать суммарного потока, обеспечивающего электрическое равновесие как в статоре, так и в роторе.

Совсем иначе обстоит дело в коллекторном моторе трехфазного тока. Щетки ротора здесь образуют текучие фазные обмотки ротора, которые, при неподвижном положении щеток, находятся в покое относительно статора. Поэтому вращающийся поток статора и ротора в состоянии образовывать правильный суммарный вращающийся поток.

Но, вообще говоря, оба потока можно сдвинуть друг относительно друга. Мы можем во всякое время передвинуть щетки. Но, передвигая щетки, мы изменяем положение осей фазных обмоток ротора. Мы можем создать между осями потока ротора и статора любой угол и заставить действовать оба потока в одном или в противоположном направлении.

Все происходит так, как описано выше, независимо от того, находится ли ротор в покое, или движется; не играет роли также скорость его вращения. Мы всегда имеем в статоре и в роторе неподвижные друг относительно друга обмотки, при чем взаимное их положение может быть установлено при помощи сдвига щеток.

Теперь снова вернемся к рассмотрению холостого хода, при котором у асинхронного мотора имеет место синхронизм, так как мы предполагаем отсутствие потерь. Мы уже убедились в том, что ротор участвует в образовании вращающегося потока, наводящего в статоре напряжение, противодействующее напряжению сети. При правильном положении щеток мы,

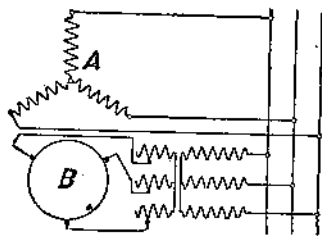


Рис. 197

очевидно, можем получить в роторе этот поток полностью, тем самым разгружая статор от намагничивающего тока.

На первый взгляд мы этим ничего не выигрываем. При одинаковом числе проводников в статоре и в роторе мы должны теперь в роторе иметь такой же намагничивающий ток, какой имели раньше в статоре. Но для протекания намагничивающего тока в обмотке ротора последний нуждается в напряжении, так как при синхронном вращении мотора в роторе напряжения отсутствуют. Между тем, чтобы пропустить этот же намагничивающий ток через обмотку статора потребовалось бы полное рабочее напряжение.

Только при заторможенном роторе было бы безразлично, пропускать ли намагничивающий ток через статор или через ротор. Между тем возбуждение мотора через щетки ротора имеет громадные преимущества. Включенный между ротором и первичной сетью трансформатор уменьшает забираемый из сети намагничивающий ток во столько же раз, во сколько этот трансформатор уменьшает подводимое к ротору напряжение сети.

Уже этим достигается почти совершенная компенсация угла сдвига фаз, эта мечта строителей моторов трехфазного тока, так как при работе мотора под нагрузкой даже при одинаковом числе проводников в статоре и в роторе напряжение в последнем составляет всего лишь несколько процентов от напряжения статора. Но не следует довольствоваться только тем, что мы перенесли возбуждение в ротор. Мы можем, кроме того, еще перевозбудить последний. Этим мы понуждаем статор забирать из сети опережающий размагничивающий ток. И в этом случае, перевозбуждение ротора мало сравнительно с величиной опережающего тока в статоре. Итак, мы видим, что при желании не трудно получить более чем полную компенсацию сдвига фаз.

94. ВОЗБУЖДЕНИЕ КОЛЛЕКТОРНОГО МОТОРА ТРЕХФАЗНОГО ТОКА.

Возбуждение коллекторного мотора трехфазного тока, в статоре которого имеют место такие же явления, как у трехфазного асинхронного мотора, может происходить одновременно со стороны статора и ротора. Это положение полезно проследить на векторных диаграммах.

Пусть обмотка статора содержит Z_1 , а обмотка ротора Z_2 проводников на фазу. Под действием намагничивающего тока I_{m1} обмотка статора создала бы синусоидальный вращающийся поток, максимальная плотность которого пропорциональна $I_{m1} \cdot Z_1$. Точно также и обмотка ротора при условии прохождения в ней намагничивающего тока I_{m2} создала бы вращающийся магнитный поток с максимальной плотностью, пропорциональной $I_{m2} \cdot Z_2$.

Намагничивающие токи вызываются одним и тем же напряжением сети, но они не должны отставать оба от последнего на 90° . Наведенное в роторе вращающимся потоком напряжение не должно быть направлено по фазе противоположно напряжению сети. Понятно, что здесь имеет значение еще взаимное расположение осей фазных обмоток статора и ротора. Многие, следовательно, зависит от положения щеток. При помощи последних можно привести к совпадению осей соответствующих фазных обмоток. При совпадении осей фазных обмоток действие обеих магнитодвижущих сил может быть направлено одинаково или противоположно друг другу. В первом случае мы будем иметь так называемое положение возбуждения щеток.

Легко видеть, что в этом случае суммарный вращающийся поток равен

$$I_{m1} \cdot Z_1 + I_{m2} Z_2.$$

Если сдвинуть щетки из положения возбуждения на угол α , то мы получим вращающийся поток, пропорциональный геометрической сумме магнитодвижущих сил (рис. 198).

При помощи регулировочного трансформатора магнитодвижущую силу $I_{m2} Z_2$ можно получить произвольной величины. Магнитодвижущая сила возбуждения в статоре устанавливается сама собой так, чтобы получился нужной величины суммарный магнитный поток. Последний обеспечивает необходимое электрическое равновесие в статоре между наведенным и приложенным напряжением. Кроме того, тот же суммарный вращающийся поток одновременно создает электрическое равновесие и в роторе. Отсюда можно сделать заключение, что коллекторный мотор трехфазного тока отличается от асинхронного мотора тем, что допускает изменение числа оборотов.

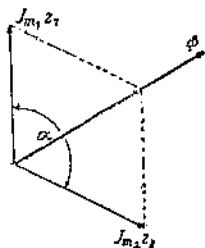


Рис. 198

Если при некотором положении щеток оси статора и ротора не совпадают, то при этом не может иметь места и совпадение фаз наводимых в статоре и в роторе напряжений. Углы сдвига щеток α соответствует всегда угол сдвига фаз между напряжениями α ; оба угла, разумеется, измеряются в электрических градусах. В этом легко убедиться, если учесть, что вращающийся поток должен повернуться на угол α , чтобы занять относительно ротора такое же положение, какое он занимает в данный момент относительно статора.

Ток холостого хода в роторе обуславливается величиной приложенного и наведенного в нем напряжения. Если щетки сдвинуты из положения возбуждения, то I_{m1} и I_{m2} не могут уж больше совпадать по фазе, так как в статоре наведенное напряжение направлено противоположно приложенному. В виду этого рис. 198 должен быть заменен рис. 199; последний соответствует случаю, когда щетки сдвинуты из положения возбуждения по направлению вращения потока на угол α , а ток I_{m2} отстает на φ электрических градусов от намагничивающего тока в статоре I_{m1} .

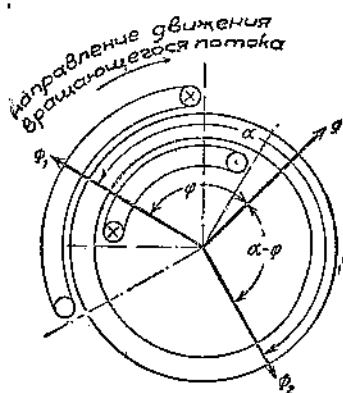


Рис. 199

На рис. 199 показана фазная обмотка статора и соответствующая фазная обмотка ротора. Как известно, когда в фазной обмотке статора протекает намагничивающий ток максимальной величины, в этот момент наступает совпадение осей вращающегося потока статора и обмотки. Но пока намагничивающий ток в соответствующей фазе ротора приобретает максимальное значение, вращающийся поток статора Φ_1 успевает повернуться на электрический угол φ . В виду этого, между осями вращающегося потока статора и ротора в результате получается угол $\alpha - \varphi$, а не угол α , как показано на рис. 198.

У нас остался открытым вопрос, каким образом получается электрическое равновесие в роторе. Суммарное напряжение ротора, определяемое

приложенным и наведенным напряжением, расходуется на то, чтобы вызвать прохождение намагничивающего тока в сопротивлениях обмотки ротора. Суммарный вращающийся поток движется относительно статора со скоростью

$$n_1 = \frac{120 f_1}{p} \text{ об./сек.}$$

где, как известно, f_1 — число периодов сети, p — число полюсов; относительно ротора, в свою очередь вращающегося с числом оборотов n , указанный поток движется со скоростью

$$n_2 = n_1 - n \text{ об./сек.}$$

Отсюда мы делаем вывод, что периодичность наведенного в роторе напряжения равна

$$f_2 = \frac{p \cdot n_2}{120}.$$

Электрическое равновесие в роторе, приключенном к сети с периодичностью f_1 , кажется невозможным.

Тем не менее оно возможно. Напряжения на проводниках ротора, имеющие периодичность f_2 , суммируются и проявляются на щетках коллектора в виде напряжения текущей обмотки. Коллектор преобразует число периодов. В следующей главе мы увидим, как это получается.

95. КОЛЛЕКТОР, КАК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧИСЛА ПЕРИОДОВ.

Прежде чем приступить к составлению векторной диаграммы коллекторного мотора трехфазного тока, целесообразно уяснить себе, как происходит в цепи ротора преобразование числа периодов. Для понимания принципа действия коллекторного мотора представляется совершенно необходимым всесторонне осветить этот вопрос.

Ротор имеет замкнутую обмотку постоянного тока. Вращающийся поток представляет собой синусоидально распределенный вдоль окружности ротора постоянный поток. Предположим, что последний неподвижен, и будем рассматривать только относительное перемещение ротора; мы получим тогда для напряжений на обмотке ротора потенциальную окружность, как для машины постоянного тока. Двум любым точкам на обмотке ротора A и B на потенциальной окружности соответствуют также две точки A и B ; хорда AB представляет собой вектор наводимого вращающимся потоком между указанными двумя точками напряжения.

Если ротор вращается со скоростью n оборотов в минуту относительно вращающегося потока, то периодичность напряжения в каждом проводнике равна

$$f_2 = \frac{p \cdot n}{120} "$$

Такую же периодичность имеет и напряжение между точками A и B , так как последние вращаются вместе с ротором. Мгновенные значения напряжения AB измеряются проекцией соответствующих векторов на линию времён, вращающейся как показано на рис. 200, с угловой скоростью

$$\omega_2 = 2\pi f_2$$

Потенциальная окружность тогда принимается неподвижностью; точки A и B на ней изображают начало и конец соответствующей части обмотки.

Проще, однако, считать неподвижной линию времен, а вращать с угловой скоростью ω_2 потенциальную окружность. Тогда перемещение точек A и B на потенциальной окружности совершается аналогично их перемещению на роторе, а вектор напряжения будет занимать различное относительно линии времен положение.

Наложим на коллектор две неподвижные относительно магнитного потока щетки так, чтобы точки $A^1 B^1$ обмотки занимали всегда одно и то же положение по отношению к потоку (рис. 201). Теперь напряжение A' и B' изменяться не будет, так как точки A' и B' не могут вращаться вместе с потенциальной окружностью; это напряжение все время будет равно проекции на неподвижную линию времен.

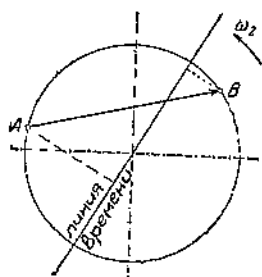


Рис. 200

Неподвижные относительно магнитного потока щетки неизбежно создают постоянные напряжения; коллектор в этом случае обращает число периодов, равное f_2 , в нуль.

Все вышеизложенное уже знакомо нам из теории машин постоянного тока. Сделаем, однако, еще один шаг вперед. На этот раз заставим щетки, соединенные с точками A'' и B'' обмотки, вращаться

с некоторой угловой скоростью ω_x по направлению вращения потенциальной диаграммы. Для этого нам достаточно вращать щетки с угловой скоростью ω_x по направлению относительного движения ротора.

Теперь вектор напряжения A'' и B'' начнет вращаться с угловой скоростью ω_x относительно находящейся в покое линии времен. Величина напряжения на щетках зависит от скорости относительного движения ротора, периодичность же определяется скоростью относительного движения щеток

$$f_x = \frac{\omega_x}{2\pi}.$$

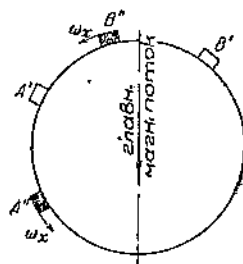


Рис. 201

Отсюда ясно, что, сообщив щеткам соответствующее число оборотов относительного вращающегося потока, мы получаем при помощи коллектора любое число периодов; последнее можно сделать равным также периодичности сети.

Итак, коллектор оказался весьма совершенным преобразователем числа периодов. При помощи коллектора можно увеличивать или уменьшать подводимое к нему напряжение; кроме того, теоретически, он дает возможность изменять число периодов. Напряжение пропорционально скорости движения обмотки относительно магнитного потока, а число периодов пропорционально числу оборотов щеток относительно того же потока.

Вернемся снова к коллекторному мотору трехфазного тока; в нем обмотка статора находится в покое. Для того, чтобы в обмотке статора наводились напряжения периодичности f_1 , суммарный вращающийся поток должен вращаться относительно этой обмотки с окружной скоростью

$$\omega_1 = 2\pi f_1.$$

Роторные щетки неподвижны относительно статора и движутся относительно вращающегося потока с окружной скоростью ω_1 ; ротор, отставая

от синхронизма, вращается относительно вращающегося потока с окружающей скоростью

$$\omega_2 = 2\pi f_2 = 2\pi \frac{pn}{120}.$$

Между щетками коллектора устанавливается роторное напряжение, величина которого пропорциональна f_2 , а число периодов равно

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi}.$$

Если заставить щетки вращаться по коллектору относительно статора с угловой скоростью ω_1 , равной угловой скорости вращающегося потока, то мы получим постоянное напряжение, величина которого, однако, пропорциональна f_2 .

Если же щетки будут вращаться относительно вращающегося потока с угловой скоростью ротора ω_2 , то они будут находиться в покое относительно последнего и будут, следовательно, играть роль контактных колец; в этом случае периодичность напряжения в роторе будет равна f_2 .

96. ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА КОЛЛЕКТОРНОГО МОТОРА ТРЕХФАЗНОГО ТОКА.

Теперь можно приступить к составлению векторной диаграммы коллекторного мотора трехфазного тока. При одинаковом числе проводников в статоре и в роторе и при неподвижном роторе будем иметь:

$$E_2 = E_1,$$

т.е. наведенное напряжение в роторе и в статоре одинаково. Если синхронное число оборотов равно

$$n_1 = \frac{120 \cdot f_1}{p}$$

и ротор вращается со скоростью n оборотов в минуту, то напряжение в роторе будет в

$$\frac{n_1 - n}{n_1} = \sigma$$

раз меньше, чем напряжение в статоре. Каждому числу оборотов соответствует в роторе свое напряжение, пропорциональное скольжению σ . Очевидно,

$$n_1 - n = n_2$$

а

$$f_2 = \frac{pn_2}{120} = \frac{pn_1}{120} \cdot \frac{n_1 - n}{n_1} = f_1 \cdot \sigma.$$

Следовательно, при одинаковом числе проводников в статоре и в роторе, наведенные в них фазные напряжения находятся в следующей зависимости

$$E_2 = \sigma E_1$$

и имеют одинаковое число периодов f_1 .

При составлении векторной диаграммы шунтового коллекторного мотора трехфазного тока, изображенного на рис. 197, лучше всего начинать с вектора приложенного к статору напряжения сети E (рис. 202).

Последнему противодействует наведенное суммарным потоком Φ напряжение E_1 ; разность между этими напряжениями поглощается

создаваемыми током I_1 падениями напряжения в сопротивлениях статора $I_1 R_1$ и $I_1 X_1$.

При сдвиге роторных щеток на α электрических градусов против движения вращающегося потока, направление вращения легко определяется, если принять во внимание отставание наведенного в статоре напряжения от суммарного вращающегося потока (рис. 202); при таком сдвиге щеток наведенное в роторе напряжение

$$E_2 = c E_1$$

опережает наведенное в статоре напряжение E_1 на угол α . При помощи трансформатора, передаточное число которого можно положить

$$\xi < 1$$

к ротору подводится из сети напряжение ξE . На векторной диаграмме рис. 202 легко получить действующее в роторе напряжение, преодолевающее только создаваемое в роторе током I_2 падение напряжения $I_2 R_2$ и $I_2 X_2$.

Если статор содержит Z_1 , а ротор Z_2 проводников, то суммарный вращающийся поток возбуждается совместным действием магнитодвижущих сил $I_1 Z_1$ и $I_2 Z_2$. Но, согласно рис. 199, между векторами $I_1 Z_1$ и $I_2 Z_2$ существует угол $\alpha - \varphi$. В данном случае угол α отрицателен. Поэтому, чтобы получить между векторами нужный угол $\alpha + \varphi$, на рис. 202 необходимо повернуть вектор $I_2 Z_2$ относительно вектора I_2 на угол φ .

Рис. 202

В результате, вектор действующей суммарной магнитодвижущей силы $I_m Z$ совпадет по направлению с вектором потока Φ . Но суммарный забиремый из сети ток не может быть получен простым суммированием токов I_1 и I_2 . По отношению к сети ток в роторе I_2 уменьшается трансформатором до величины ξI_2 . Результат такого уменьшения тока I_2 легко увидеть на рис. 202. Некоторую трудность для понимания представляет изменение угла сдвига фаз во времени и пространстве, положенное в основу построения векторной диаграммы рис. 202. Легко видеть, что доминирующую роль играет положение оси статорной обмотки. В момент совпадения осей суммарного магнитного потока с осью обмотки статора наводимое в последнем напряжение E_1 переходит через нуль. Углу сдвига фаз в пространстве, равному 0 градусов, соответствует сдвиг во времени в 90° . Итак, несмотря на то, что в пространстве ток совпадает с магнитным потоком, активным оказывается лишь ток, сдвинутый во времени на 90° относительно вращающегося потока.

Так как угол сдвига щеток зависит только от их положения относительно обмотки статора, то из векторной диаграммы мы можем сделать несомненный вывод, что передаточное число должно отразиться на соотношении рабочих величин. Следовательно, должен существовать рабочий параметр, изменения которого соответствовали бы заданному передаточному числу. Таким параметром является число оборотов, или зависящее от последнего — скольжение.

На рис. 203 представлено соотношение напряжений в роторе.

При построении диаграммы нужно исходить из приложенного к ротору напряжения ξE_1 . Кроме того, диаграммой предусмотрено, что наведенное в роторе напряжение

$$E_2 = \sigma E_1$$

пропорционально скольжению; индуктивное сопротивление обмотки ротора также не является величиной постоянной, так как оно в свою очередь пропорционально скольжению, величина которого зависит от числа периодов

$$f_2 = \sigma f_1.$$

Если бы в цепи ротора не существовало других сопротивлений и если бы скольжение оставалось постоянным, то фаза роторного тока заданного значения зависела бы только от передаточного числа ξ трансформатора.

В том случае, когда сделанные допущения, действительно, имеют место, ток ротора, при некотором заданном значении передаточного числа ξ , будет уменьшаться по мере уменьшения скольжения. Одновременно будет изменяться также фаза роторного тока; угол сдвига фаз между последним и приложенным напряжением ξE будет все время приближаться к 90° — в сторону отставания.

При холостом ходе в роторе мотора не получается никакого тока, так как при этом ток должен был бы совпадать по фазе с вращающимся потоком. Следовательно, в этом случае, согласно рис. 202, приложенное к ротору напряжение ξE направлено противоположно наведенному напряжению E_2 , что справедливо, конечно, только при отсутствии потерь.

Из этого следует, что мотор при любом скольжении, или, иными словами, при любом числе оборотов может работать вхолостую. Согласно рис. 203, имеем

$$\xi E = \sigma E_1 + I_2 \cdot \sigma x_2,$$

где x_2 представляет собой индуктивное сопротивление неподвижного ротора. Отсюда получаем

$$\sigma = \xi \frac{E}{E_1 + I_2 X_2}.$$

Мотор может работать при числе оборотов, выше и ниже синхронного. Мы привыкли считать скольжение положительным, когда ротор при своем вращении отстает от синхронного числа оборотов. Отрицательное же скольжение соответствует числу оборотов, превышающему синхронное.

При переходе ротора через синхронизм фаза наведенного в нем напряжения меняет свой знак. В этом случае приходится прибегать к большому углу сдвига щеток. Индуктивное сопротивление ротора, разумеется, не может стать отрицательным.

В результате, при помощи шунтового коллекторного мотора трехфазного тока мы добиваемся того, что у простого асинхронного мотора казалось невозможным, а именно: регулировки числа оборотов и компенсации угла сдвига фаз. Коллекторный мотор очень хорошо поддается регулировке при помощи изменения передаточного числа и изменения угла сдвига щеток. Этим мы обязаны коллектору. Коммутация тока коллекторных моторов трехфазного тока приводит к таким же трудностям, как и коммутация тока в однофазных коллекторных моторах.

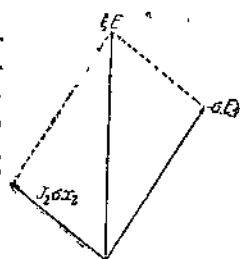


Рис. 203

97. РАЗНОВИДНОСТИ КОЛЛЕКТОРНЫХ МОТОРОВ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА.

Коллекторный мотор трехфазного тока с параллельно включенными цепями статора и ротора имеют уже большую давность, такую же как коллекторный мотор с последовательным включением статора и ротора.

Уже в 1891 году Görges предложил снабдить трехфазный мотор коллектором. Но это время было неподходящим для распространения коллекторных моторов трехфазного тока. Трехфазный ток сам по себе еще нуждался в признании, требовалось еще убедиться в том, что обыкновенный асинхронный мотор не может удовлетворить всем требованиям эксплуатации; кроме того проблема коммутации тогда еще не получила своего полного разрешения.

За Görges'ом выступил Scherbius с компаундным коллекторным мотором трехфазного тока, а затем Heyland — с компенсированным мотором. Старый мотор Görges'a впоследствии снова ожил; он исполняется с параллельным и последовательным включением.

Но трехфазный коллекторный мотор далеко не приобрел такого значения, как коллекторный мотор однофазного тока. Это произошло по двум причинам, на которых мы ниже и остановимся.

Чтобы получить право на существование, трехфазный коллекторный мотор должен быть лучше трехфазного асинхронного, а однофазный коллекторный мотор — лучше однофазного асинхронного. Вполне понятно, что первая задача несравненно трудней, так как трехфазный асинхронный мотор представляет собой прекрасную машину, в то время, как однофазный асинхронный мотор обладает весьма крупными недостатками.

Компенсация угла сдвига фаз и экономичная регулировка числа оборотов говорят в пользу коллекторных моторов трехфазного тока. В защиту асинхронного мотора нужно здесь же отметить, что одно только компенсирование сдвига фаз не оправдывает введения коллектора.

В этом убедился Heyland, когда он выступил со своим компенсированным мотором трехфазного тока.

Компенсация сдвига фаз у компенсированного мотора достигается тем, что коллектор используется для подвода намагничивающего тока со стороны ротора. Тем не менее, машина работает в качестве асинхронного мотора. В этом нас убеждает тот факт, что для присоединения к коллектору в роторе существует специальная обмотка; настоящая же рабочая обмотка снабжена контактными кольцами и приспособлением для короткого замыкания.

Вполне понятно, что компенсированный трехфазный мотор оказался дороже простого асинхронного. Увеличение первоначальных затрат и наличие коллектора компенсацией сдвига фаз не оправдывается. Поэтому мотор Heyland'a распространения получить не мог.

Вскоре после мировой войны были снова сделаны попытки вернуться к компенсированным моторам трехфазного тока. Эта вторичная попытка может быть объяснена только изменившейся экономической конъюнктурой и неустойчивостью цен. Но следует сказать, что и эта попытка оказалась неудачной. Однофазному коллекторному мотору предстоял гораздо более легкий путь. Прежде всего, он с самого начала представлял собой однофазный мотор. Последний легко пускается и обладает большим вращающим моментом. Даже без компенсации сдвига фаз этот мотор имел все шансы на распространение. Но особые качества однофазного коллекторного мотора, заключающиеся в способности компенсировать

сдвиг фаз и регулировать число оборотов, довершили окончательно победу над его слабым противником.

Электрические железные дороги нуждаются в регулировке числа оборотов моторов, и по вполне понятным причинам — простота подвода тока — здесь предпочтительней однофазные моторы. Вторая причина, почему однофазный коллекторный мотор приобрел гораздо больше значения, чем трехфазный, заключается именно в этом факте.

Следует сказать, что только самый лучший коллекторный мотор напоминает по своим свойствам мотор постоянного тока: по полной компенсации сдвига фаз, способности к регулировке и безупречной коммутации.

Только трудности, связанные с передачей энергии, при помощи постоянного тока, дают некоторый шанс на успех однофазному коллекторному мотору в борьбе с его опасным конкурентом и предком. В Америке и в Европе до сего времени на железных дорогах коллекторные моторы не имеют достаточно широкого применения.

Как известно, возможно совершенно новое разрешение проблемы передачи энергии, при котором постоянный ток снова приобретет весьма большое значение. Для этой исключительной проблемы техники силовых токов весьма существенно использовать все возможности построения коллекторных моторов.

Кроме того, остается еще неразрешенным вопрос, не изберет ли электромашиностроение себе совершенно новые пути. Если бы это действительно произошло, то это должно, прежде всего, коснуться прототипа всех электрических машин — трансформатора.

Все наши современные машины представляют собой не что иное, как трансформаторы. Все предшествовавшее изложение принципа действия различных разновидностей машин убеждает нас в этом. Если будет изжит простой однофазный трансформатор, то значит будет изжито все современное электромашиностроение.

Пока что еще нет никаких поводов опасаться за непоколебимость основ нашего электромашиностроения. Наши электрические машины в том виде, как мы их строим в настоящее время, достаточно хороши. Они лучше, чем любые другие неэлектрические машины. Трудно поверить, чтобы нашлось что-нибудь более совершенное.

Литература, использованная при составлении настоящей книги.

Petersen W. Wechselstrommaschinen. Allgemeine Elektrotechnik. Bd. 3. Stuttgart: Bake.

Arnold E. Wechselstromtechnik. Berlin: Julius Springer.

Pichelmayer K. Dynamobau. Handbuch der Elektrotechnik. Leipzig: S. Hitzel.

Vidmar M. Transformatoren. Berlin: Julius Springer.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	Стр. 3
Введение	5
1. Назначение электрических машин. Задача теории	5
I. Трансформатор.	
2. Значение трансформации. Трансформатор напряжения. Трансформатор тока	9
3. Выполнение трансформаторов. Закон индукции	10
4. Нагрузка трансформатора. Закон равновесия	12
5. Падение напряжения и потеря энергии	14
6. Эквивалентная схема трансформатора	16
7. Потери энергии в железном сердечнике	19
8. Намагничивающий ток трансформатора	21
9. Влияние коэффициента мощности на нагрузку трансформатора	23
10. Короткое замыкание трансформатора	25
11. Принцип действия трансформатора. Коэффициент полезного действия	28
12. Годовой коэффициент полезного действия. Стремление к удешевлению	30
13. Трансформатор тока	32
14. Автотрансформатор	33
II. Механизирование трансформации.	
15. Индуктирование при вращающихся обмотках	35
16. Закон индукции для вращающихся обмоток	36
17. Контактные кольца. Онда тока. Баланс энергии в электрических машинах	39
18. Наведение напряжений. Периодичность и число полюсов	41
19. Кривая напряжений. Выступающие полюсы. Распределенная обмотка возбуждения	44
20. Обмотки якоря	46
21. Напряжение обмотки	48
22. Трехфазные обмотки	51
23. Трехфазные трансформаторы. Вращающийся магнитный поток	53
24. Возбуждение вращающегося магнитного потока	55
25. Уточнение представления о вращающемся магнитном потоке. Двухфазный ток	58
26. Обзор форм исполнения электрической машины	61
III. Синхронные машины.	
27. Конструкция синхронной машины	64
28. Холостой ход синхронной машины	65
29. Форма кривой напряжения синхронной машины	67
30. Векторная диаграмма холостого хода синхронной машины	70
31. Получение первичной и вторичной магнитодвижущей силы	72
32. Упрощенные векторные диаграммы нагруженной синхронной машины	75
33. Кажущееся индуктивное сопротивление вторичной обмотки синхронной машины	77
34. Включение синхронной машины в сеть	78
35. Влияние возбуждения на нагрузку синхронной машины	80
36. Синхронная машина, как мотор. Круговая диаграмма	82
37. Вращающий момент синхронной машины	84
38. Влияние возбуждения на работу синхронного мотора	85
39. Работа синхронной машины генератором	87

	Стр.
40. Качания синхронной машины	89
41. Влияние выступающих полюсов. Теория поперечного поля	90
42. Потери энергии синхронной машины	92
IV Асинхронная машина.	
43. Выполнение асинхронной машины	96
44. Асинхронная машина, как трансформатор	97
45. Вращающийся трансформатор	99
46. Вращающаяся асинхронная машина	101
47. Число оборотов асинхронной машины. Скольжение	103
48. Всеобщий трансформатор	106
49. Эквивалентная схема асинхронной машины	108
50. Графическое исследование эквивалентной схемы асинхронной машины	110
51. Круговая диаграмма асинхронной машины. Коэффициент мощности	114
52. Изображение потерь в первичной цепи	116
53. Прямая оставшейся мощности в круговой диаграмме	117
54. Изображение потерь в железе статора	119
55. Линия вращающихся моментов на круговой диаграмме	121
56. Изображение тепловых потерь в роторе. Линия мощности	123
57. Значение сопротивления ротора. Величие колеса и фазный ротор	125
58. Значение числа полюсов асинхронной машины	128
59. Изображение коэффициента полезного действия и скольжения на круговой диаграмме	129
60. Обзор круговой диаграммы	131
V Коллекторные машины.	
61. Значение коллектора	134
62. Униполярная машина	135
63. Текущие обмотки	137
64. Замкнутые обмотки якоря	138
65. Потенциальная окружность замкнутой обмотки якоря	141
66. Возбужденная машина постоянного тока	143
67. Напряжение машины постоянного тока	145
68. Положение щеток и величина напряжения постоянного тока	147
69. Теория мотора постоянного тока	149
70. Шунтовой и последовательный мотор	151
71. Влияние формы кривой характеристики холостого хода	153
72. Обмотка возбуждения машины постоянного тока	155
73. Магнитный поток якоря и компенсационная обмотка	156
74. Коммутация тока машин постоянного тока	158
75. Теория коммутации тока	160
76. Компенсация напряжения самоиндукции при коммутации тока	162
77. Сдвиг щеток, как решение проблемы коммутации	164
78. Добавочные полюсы	166
79. Одноякорный преобразователь	167
80. Нагревание в обмотке якоря одноякорного преобразователя	171
81. Эксплуатация одноякорного преобразователя	173
82. Регулирование напряжения одноякорного преобразователя	175
83. Машина постоянного тока, работающая на переменном токе	177
84. Напряжение вращения и напряжение трансформации	179
85. Напряжение, трансформации и коммутации тока	181
86. Однофазный коллекторный мотор последовательного возбуждения	184
87. Коллекторный мотор, как двойной трансформатор	187
88. Теория мотора Atkinson'a-Déri	189
89. Мотор Winter-Eichberg-Latour'a	190
90. Теория мотора W.-E.-L.	192
91. Детали исполнения мотора W.-E.-L.	195
92. Расщепление щетки мотора W.-E.-L. Двойное питание	196
93. Коллекторный мотор трехфазного тока	199
94. Возбуждение коллекторного мотора трехфазного тока	201
95. Коллектор, как преобразователь числа периодов	203
96. Векторная диаграмма коллекторного мотора трехфазного тока	205
97. Разновидности коллекторных моторов трехфазного тока	208