

УДК 621.31(075.8)
ББК 31.2я73
Г63

Рецензенты —
проф. Московского авиационного института (ГТУ) (МАИ), д-р техн. наук
Б. Л. Аленицкий,
зав. кафедрой «Электрооборудование и автоматика» Российского
государственного аграрного заочного университета (РГАУЗУ), д-р техн. наук,
проф. *А. В. Ширяев*

Гольдберг О. Д.
Г63 **Электромеханика : учебник для студ. высш. учеб. заведе-**
ний / О. Д. Гольдберг, С. П. Хелемская ; под ред. О. Д. Гольд-
берга. — М. : Издательский центр «Академия», 2007. — 512 с.
ISBN 978-5-7695-2886-6

Рассмотрены основные электромеханические преобразователи энергии. Особое внимание уделено изучению трансформаторов и синхронных машин, а также вопросам эксплуатации асинхронных двигателей и машин постоянного тока. Представлены конструкции иложены теории электрических машин, их стационарные и переходные режимы работы.

Для студентов высших учебных заведений. Может быть полезна инженерам-электроэнергетикам и электромеханикам, занимающимся эксплуатацией и ремонтом электрических машин на электрических станциях и предприятиях.

УДК 621.31(075.8)
ББК 31.2я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом
без согласия правообладателя запрещается*

© Гольдберг О. Д., Хелемская С. П., 2007
© Издательско-издательский центр «Академия»,
2007
© Оформление. Издательский центр «Академия»,
2007

ISBN 978-5-7695-2886-6

ПРЕДИСЛОВИЕ

*Посвящается 75-летию
Московского государственного
открытого университета*

В настоящее время отечественной промышленностью изготовляются асинхронные двигатели мощностью от 0,12 до 400 кВт и мощностью от 400 до 1 000 кВт, синхронные генераторы мощностью от 5 до 50 кВт серии ЕСС и мощностью от 125 до 800 кВт серии СГ2, синхронные двигатели мощностью от 132 до 1 000 кВт СД2 и СД32, машины постоянного тока серии 4П мощностью от 1 000 кВт.

Машины этих серий обладают высокими технико-экономическими показателями, находящимися на уровне современных серий ведущих зарубежных фирм. Новые серии разработаны с учетом международных норм — рекомендаций Международной электротехнической комиссии (МЭК).

Научно-технический прогресс в области электротехнических статей, изоляционных материалов и обмоточных проводов приводит к тому, что почти все электромашиностроительные фирмы, в том числе электромашиностроительные заводы России, каждые 10—20 лет обновляют единые серии электрических машин. Так, вместо единой серии 4А, разработаны единые серии АИ, 5А, КА. Раньше новые серии электродвигателей разрабатывались для удовлетворения спроса на внутреннем рынке страны, теперь же все большее внимание уделяется международной стандартизации и мировым тенденциям в развитии машиностроения, для того чтобы выпускаемые электрические машины пользовались спросом на внешнем рынке.

Принципы устройства электрических машин на протяжении последних десятилетий остались в основном теми же, однако коренным образом изменилось их конструктивное оформление, рабочие характеристики и технико-экономические показатели. Наибольший удельный вес в выпуске электрических машин занимают асинхронные двигатели, конструкции которых относительно проста, а трудоемкость изготовления мала.

При рассмотрении работы отдельных видов электрических машин вначале определяется их назначение, а затем — принцип действия и конструкция.

При описании работы трансформаторов особое внимание уделено вопросам, актуальным для будущих инженеров-энергетиков: несимметричной нагрузке трансформаторов, их параллельной ра-

боте, а также переходным процессам в трансформаторах и защите их от перенапряжений.

Общие положения теории машин переменного тока выделены в отдельную главу, где рассмотрены методы определения МДС и ЭДС обмоток переменного тока.

В главе «Асинхронные машины» подробно исследован основной для асинхронных машин режим работы двигателем: образцовый электромеханический момент, проблемы пуска и регулирования частоты вращения.

Наибольшее внимание при описании работы синхронных машин уделено режиму генератора, вопросам параллельной работы синхронных генераторов, регулированию активной и реактивной мощности, внезапному и установившемуся короткому замыканию синхронных генераторов. Кроме того, рассмотрены системы возбуждения и охлаждения синхронных генераторов.

В главе «Машины постоянного тока» особое внимание посвящено вопросам, которые являются основными для инженеров, эксплуатирующих эти машины, — коммутации, способам ее улучшения и наладки.

Инженеры-энергетики не только эксплуатируют, но и испытывают электрические машины. Поэтому для всех рассмотренных в учебнике электрических машин подробно изложены программы и методы их испытаний, соответствующие Государственным стандартам на испытания электрических машин.

Авторы выражают благодарность профессорам Ф. А. Мамедову и В. Я. Бесталову за ценные советы при подготовке рукописи к изданию, а также сотрудникам МГОУ кафедры «Электрические машины» канд. техн. наук, доц. А. С. Сафонову и инж. А. А. Сафоновой за помощь в оформлении рукописи.

1.1. История развития электрических машин

При производстве и использовании электрической энергии необходимо преобразовывать механическую энергию в электрическую, электрическую в механическую, а также электрическую энергию одного вида тока в энергию другого рода тока. Такое преобразование осуществляется при помощи электромеханических преобразователей (электрических машин).

Изучение теории и конструкции электрических машин невозможно без знания истории их развития. В ней можно выделить ряд характерных этапов: появление первых электрических машин; начальный этап их промышленного использования; изобретение первых трехфазных электрических машин; развитие теории электрических машин, методов их расчета и проектирования; появление в связи с этим новых типов электрических машин; этап разработки более совершенной технологии, создания новых изоляционных и магнитных материалов и повышения на этой базе мощности, надежности и экономичности машин; возникновение новых отраслей в электромашиностроении в связи с широким развитием электроавтоматики, авиации, космической техники и других специальных областей.

В 1821 г. М. Фарадеем впервые была найдена возможность использования электрической энергии для получения механической работы. Пропуская ток через медный проводник, свободно подвешенный одним концом и плавающий другим в чашечке со ртутью, М. Фарадей осуществлял вращение проводника вокруг оси вертикально расположенного магнита. Эту модель можно рассматривать как прототип современного электродвигателя. Однако дальнейшее развитие идеи электрического двигателя под влиянием конструкций паровых машин пошло по другому пути. Для преобразования электрической энергии в механическую стремились использовать возвратно-поступательное движение в паровых машинах. Роль поршней и цилиндров играли электромагниты. Только в 1834 г. академик Б. Якоби предложил электродвигатель, в котором вращательное движение достигалось электромагнитным путем. Момент вращения в этом двигателе создавался в результате

взаимодействия неподвижных и вращающихся электромагнитов, ток в которых в соответствующие моменты времени переключался коммутатором. Поскольку в качестве источников питания электродвигателей того времени служили гальванические элементы, электродвигатели были мало экономичны и конкурировать с паровой машиной не могли. Внедрение в промышленность электродвигателей требовало создания более мощных и экономичных источников тока — электрических генераторов.

Развитие двигателей и генераторов шло по независимым путям, хотя принцип обратимости был сформулирован Э. Ленцем еще в 1833 г. Возможность создания электрического генератора, способного заменить гальванический элемент, появилась после открытия М. Фарадеем в 1831 г. закона электромагнитной индукции. Уже через год братьям Пикси на основе открытия М. Фарадея удалось сконструировать первый генератор электрического тока с вращающимися постоянными магнитами. Стремление получить генератор, заменяющий гальванические элементы, т.е. дающий постоянный ток, привело к тому, что почти все машины того времени имели специальные коммутаторы для выпрямления тока.

Следующим этапом развития генераторов явились явма в 1845 г. постоянных магнитов электромагнитами. Таким образом, электромагниты в генераторах нашли применение значительно позднее, чем в двигателях. Следующим шагом в совершенствовании генератора явилось его самовозбуждение. Идея самовозбуждения была впервые высказана датским инженером С. Хуртом в 1852 г., однако только в 1867 г. она получила свое практическое применение в машинах В. Сименса.

Начальный этап развития электрических машин связан главным образом с постоянным током, так как потребителями электрической энергии служили установки для гальванопластики, затем дуговые электрические лампы, а для двигателей источниками тока являлись гальванические элементы. Генератор, созданный после электродвигателя, быстро обогнал его в развитии, что было обусловлено развитием электроосветительных установок. В 70-х годах XIX в. осветительные установки являлись основными потребителями электрической энергии. Для них необходим был новый мощный источник питания. Это способствовало быстрому развитию генераторов постоянного тока и увеличению их мощности. В 1860 г. А. Пачинотти впервые предложил кольцевой зубчатый якорь с многоякорной обмоткой, позволяющий получить более рациональную конструкцию машины. Однако свое изобретение А. Пачинотти представил в виде небольшой модели, и поэтому его идея на долгие годы была забыта.

В 1867 г. В. Сименс применил принцип самовозбуждения для генераторов последовательного возбуждения, благодаря которо-

му они вскоре получили широкое распространение в осветительных установках. В том же году Д. Максвелл разработал математическую теорию машины с самовозбуждением, которая являлась первым фундаментальным исследованием по теории электрических машин.

В 1870 г. З. Г. Грамм, повторив в другом варианте предложение А. Пачинотти, построил машину с кольцевым якорем, который быстро вытеснил якорь с полюсными наконечниками, применявшийся в машинах постоянного тока.

В 1873 г. Ф. Герфлер-Альтенек и В. Сименс сконструировали машину с «барабанным» якорем. Таким образом, в 70-х годах XIX в. машина постоянного тока приобрела основные конструктивные элементы современной электрической машины. Одним из первых крупных потребителей электродвигателей постоянного тока был городской электрический транспорт. В 1879 г. В. Сименс на Берлинской выставке продемонстрировал первую электрическую железную дорогу. Применяемые в ней генератор и двигатель имели последовательное возбуждение.

В 1882 г. М. Депре доказал практическую возможность передачи электрической энергии постоянного тока на большие расстояния. На гидроэлектростанции в Мисбаху был установлен генератор постоянного тока мощности 2 кВт и напряжением 1 500... 2 000 В. Энергия передается в Мюнхен на расстояние 57 км и использовалась для приведения в действие водяного насоса. Опыты М. Депре открыли широкую перспективу для практического использования электрических машин.

Увеличившийся со стороны отдельных отраслей промышленности и городского хозяйства спрос на генераторы и двигатели постоянного тока выявил недостатки, тормозившие их широкое распространение. Передача энергии на расстояние требовала увеличения напряжения машины до нескольких тысяч вольт. Это представляло большие трудности и вызывало частые аварии. Кроме того, использованию машины мешала ненужная работа коллекторов. Поэтому в 80-х годах XIX в. возрос интерес электротехников к переменному току.

Генераторы однофазного переменного тока были известны давно, но вспомнили о них только в 70-х годах XIX в. в связи с развитием электроосветительных установок. Большая заслуга в развитии переменного тока принадлежит П. Яблочкову, который широко использовал этот вид тока для питания изобретенных им электрических свечей. В 1876 г. он применил для питания свечей трансформаторы последовательного включения с незамкнутым сердечником, положив тем самым начало практическому использованию трансформаторов. Принцип электромагнитного преобразования тока был известен задолго до работ П. Яблочкова и после открытия М. Фарадеем в 1831 г. явления электромагнитной индук-

они использовались в ряде устройств Пэджем (1832), Румкорфом (1851), Вардлем (1856) и другими учеными. Однако примененные для технических целей сердечника с двумя независимыми обмотками, называемого сейчас трансформатором, является несомненной заслугой П. Яблочкова. Трансформаторы с замкнутым магнитным сердечником, подобные применяемым в настоящее время, появились значительно позднее. В 1884 г. патент на такой трансформатор был выдан в Англии братьям Д. и Э. Голкинсон. Однако начало широкого практического применения одофазных трансформаторов с замкнутым сердечником связывают с именами инженеров венгерской фирмы «Ганс и К^о» — О. Блати, М. Дари и К. Цишерножского, которые в 1886 г. впервые ввели термин «трансформатор» и изготовили кольцевой и броневой трансформаторы. М. Дари первым предложил параллельное включение первичных и вторичных обмоток трансформатора.

В 1888 г. почти одновременно были опубликованы работы Г. Феррариси и Н. Тесла, в которых доказывалась возможность получения вращающегося магнитного поля при помощи двухфазного тока и создания на этом принципе двигателя переменного тока. Тем не менее началом развития электропривода на переменном токе следует считать 1889 г., когда выдающийся русский электротехник М. О. Доливо-Добровольский предложил трехфазную систему переменных токов и построил первый трехфазный асинхронный двигатель и первый трехфазный трансформатор.

В 1890 г. приступили к сооружению первой опытной высоковольтной линии передачи трехфазного тока протяженностью 175 км из города Лауфена во Франкфурт-на-Майне. В Лауфене гидротурбина приводила во вращение генератор трехфазного тока, построенный швейцарской фирмой «Эрликон». Генератор имел мощность 230 кВт, напряжение 95 В, частоту вращения 150 мин⁻¹. При помощи трехфазных трансформаторов напряжение генератора повышалось в Лауфене до 15 кВ и понижалось во Франкфурте-на-Майне до 65 В, при котором осуществлялось питание трехфазного асинхронного двигателя для насосной установки мощностью 75 кВт. Трехфазные трансформаторы для передачи и асинхронный двигатель были построены немецкой фирмой AEG по проектам М. О. Доливо-Добровольского. Лауфенская установка дала практическое начало масляным трансформаторам, предложенным впервые в 1889 г. Свинберном. В 1890 г. Ч. Броун построил два масляных трансформатора по 5 кВт и 30 кВ, при помощи которых он производил исследования линии электропередачи. Впоследствии выяснилось, что масло является не только качественной изоляцией, но и хорошей охлаждающей средой для трансформаторов.

Быстрое развитие в конце 80-х и в 90-х годах XIX в. электрических станций, особенно станций переменного тока, было обусловлено потребностью в быстроходных первичных двигателях для со-

единения их с генераторами. Тихоходные паровые машины с возвратно-поступательным движением не удовлетворяли этим требованиям. Поэтому была создана паровая турбина. Уже в начале 90-х годов XIX в. на некоторых электрических станциях использовались генераторы мощностью выше 1000 кВт, приводимые во вращение паровыми турбинами, которые получили название турбогенераторов. С увеличением быстроходности генераторов и ростом их мощности встал вопрос об определении стандартной частоты переменного тока. После сооружения ряда электрических установок на разные частоты в 90-х годах XIX в. частота переменного тока стабилизировалась: в Европе для промышленных установок была принята частота 50 Гц, а в США — 60 Гц.

Возросшие требования промышленности и транспорта к электрической энергии как к основному источнику двигательной силы обусловили в 90-х годах XIX в. разработку новых типов электрических машин. Были созданы однокорные преобразователи для питания установок постоянного тока (трамвай и др.) от сети переменного тока, а также коллекторные двигатели переменного тока.

На рубеже XIX и XX вв. закончился начальный период развития электрических машин. К этому времени уже были созданы все основные типы машин, а также разработаны основы их теории, методы расчета и проектирования.

XX в. — новый этап в истории развития электрических машин. Он характеризовался быстрым ростом промышленности и транспорта на базе электрификации. К электрической машине предъявлялись все более высокие требования в увеличении экономичности, уменьшении массы и габаритных размеров. Потребовалось широкое развитие научно-исследовательских работ по изучению электромагнитных и тепловых процессов, происходящих в электрических машинах, поиску новых изоляционных материалов и улучшению свойств электротехнической стали. На протяжении ряда десятилетий принципы устройства трансформаторов, синхронных машин и машин постоянного тока оставались неизменными, менялось лишь их конструктивное оформление, уменьшилась масса и габаритные размеры, повышалась экономичность, увеличивалось разнообразие их исполнений в соответствии с меняющимися требованиями промышленности и транспорта.

Характерной особенностью развития электрических машин, начиная с 1900 г., явилось повышение мощности отдельных единиц. Концентрация производства электрической энергии и передача ее на большие расстояния требовали повышения мощности генераторов и трансформаторов. Если в 1900 г. мощность генераторов и трансформаторов не превышала 5000 кВт·А в одной единице, то в настоящее время она возросла в десятки и сотни раз. С увеличением мощности существенно возрастало и напряжение генераторов и трансформаторов.

Электронпромышленность парковой России представляла собой группу небольших предприятий, работавших по технической документации иностранных фирм. После 1917 г. стало развиваться отечественное электромашиностроение. В середине 20-х годов XX в. советские электромашиностроители приступили к созданию новых отечественных конструкций, а также к разработке теоретических вопросов и проведению исследований, связанных с проектированием машин. К середине 30-х годов XX в. был создан и внедрен в производство ряд серий асинхронных двигателей, синхронных машин и машин постоянного тока. Развившиеся и окрепшие к этому периоду электромашиностроительные заводы выпускали, однако, разные серии электрических машин с несопадающими техническими данными, конструкцией и технико-экономическими показателями, что вызывало неудобства у потребителей при замене, ремонте и создании резерва машин.

В связи с этим возникла необходимость создания единых серий машин, которые отвечали современному техническому уровню и изготовлялись на различных заводах по единой технической документации, обеспечивая целесообразную специализацию производства на основе современной технологии. Первая единая серия наиболее массовых электрических машин — асинхронных двигателей мощностью от 0,6 до 100 кВт (серии А и АО) — была создана к началу 50-х годов XX в. Затем эта серия была расширена для диапазона мощностей от 100 до 1 000 кВт — серия А и АК. В области синхронных машин были разработаны генераторы мощностью от 12 до 75 кВт — серия ЕС, а также генераторы и двигатели мощностью от 100 до 800 кВт — серии СГ и СД. Единая серия П машин постоянного тока (двигателей и генераторов) мощностью от 0,3 до 200 кВт была создана к середине 50-х годов; затем серия расширена для диапазона мощностей от 200 до 1 400 кВт.

Опыт показывает, что изменение требований к электрическим машинам, появление улучшенных электротехнических материалов, усовершенствование конструкции и технологических процессов производства приводят к тому, что серии достаточно быстро устаревают и практически заменяются в производстве новыми через 10—20 лет (меньший срок относится к машинам с большим количественным выпуском — асинхронным двигателям мощностью до 100 кВт).

В настоящее время отечественной электронпромышленностью изготавливаются асинхронные двигатели мощностью 0,12...400 кВт и мощностью свыше 400 до 1 000 кВт, синхронные генераторы мощностью 5...50 кВт серии ЕСС и мощностью 125...800 кВт серии СГ2, синхронные двигатели мощностью 132...1 000 кВт серии СД2 и СД32, машины постоянного тока мощностью 0,37...1 000 кВт серии 4П.

Электрические машины этих серий обладают высокими технико-экономическими показателями, отвечающими уровню серий

ведущих зарубежных фирм. Новые серии разработаны с учетом международных норм-рекомендаций МЭК.

Научно-технический прогресс в области электротехнических средств, изоляционных материалов и обмоточных проводов привел к тому, что почти все электромашиностроительные фирмы мира, в том числе и России, обновляют единые серии электрических машин. Так, вместо единой серии асинхронных двигателей 4А была разработана единая серия АИ, а затем ряд электромашиностроительных заводов (в том числе в гг. Владимире и Ярославле) разработали еще более совершенные отрезки серий этих электродвигателей. При этом интересно отметить следующую тенденцию. Раньше новые серии электродвигателей разрабатывались для удовлетворения спроса на внутреннем рынке страны, теперь же все большее внимание уделяется международной стандартизации и мировым тенденциям в развитии электромашиностроения, для того чтобы выпускаемые электрические машины пользовались спросом и на внешнем рынке. Поэтому вместо единой серии машин постоянного тока П, а затем 2П разработана серия 4П.

Наибольший удельный вес в выпуске электрических машин принадлежит асинхронным двигателям, конструкция которых относительно простая, а трудоемкость изготовления малая. О масштабах применения и значении этих двигателей можно судить по тому, что асинхронные двигатели мощностью 0,12...400 кВт потребляют в России более 40 % всей вырабатываемой электрической энергии.

Синхронные машины широко используют как генераторы в передвижных и стационарных установках. При мощности свыше 100 кВт применение синхронных двигателей ограничено, хотя они обладают преимуществом перед асинхронными в том, что могут работать как с коэффициентом мощности, равным единице, так и с опережающим коэффициентом мощности, однако стоимость их выше и эксплуатация сложнее.

В ряде областей промышленности электропривод на постоянном токе значительно эффективнее по производительности и точности, чем электропривод на переменном токе, так как он может обеспечить необходимые по форме механические характеристики, плавное и экономичное регулирование частоты вращения в широких пределах, быстрый пуск и торможение, реверс и высокие кратковременные перегрузки. Выпуск этих двигателей значительно увеличивается благодаря внедрению автоматизированных производственных процессов, а также успешному развитию тиристорного привода.

В настоящее время развитие электрических машин идет по пути уменьшения их массогабаритных размеров, повышения энергетических показателей, улучшения технологичности конструкций, снижения шума и вибраций.

При этом наблюдаются следующие основные тенденции:

- применение утонченной корпусной изоляции и обмоточных проводов с малой толщиной изоляции (главным образом эмальпроводов), обладающих необходимой механической и электрической прочностью. При этом повышается коэффициент заполнения обмоточного пространства медью и соответственно использование объема машины;

- использование более нагревостойкой изоляции. В начале развития электромашиностроения применялась изоляция класса нагревостойкости А, затем — классов Е и В. В настоящее время наибольшее распространение находит изоляция класса F, а в машинах, работающих в более тяжелых условиях, — изоляция класса нагревостойкости H;

- применение улучшенных марок электротехнической стали. Широко используемые в настоящее время марки холоднокатаной электротехнической стали обладают большей магнитной проницаемостью и меньшими удельными потерями в сравнении с соответствующими марками горячекатаной стали;

- усовершенствование охлаждения машин путем повышения производительности вентиляторов, уменьшения аэродинамического сопротивления воздухопровода, увеличения поверхности охлаждения отдельных частей обмоток и всей машины за счет ребрения корпуса (в закрытых машинах), а также усиления теплопередачи путем лучшего заполнения воздушных прослоек в обмотках пропитываемыми лаками и компаундами;

- улучшение конструкции машин с придачей узлам и деталям эстетических и рациональных форм при обеспечении снижения их массы и повышения прочности.

Развитию технического уровня электрических машин способствуют и другие тенденции:

- снижение динамического момента инерции за счет уменьшения объема двигателя, следовательно, и объема вращающейся части двигателя (ротора или якоря), а также путем увеличения отношения длины сердечника ротора или якоря к его диаметру;

- повышение надежности машин, в частности за счет широкого распространения машин закрытого исполнения, в которых для улучшения охлаждения используют обдув наружной поверхности. Значительно повышает надежность электрических машин применение конструкции изоляции с более высокой электрической и механической прочностью и ряд других мероприятий;

- улучшение условий работы двигателей постоянного тока, питаемых от статических преобразователей с относительно высокими значениями пульсации напряжения, при полностью шихтованной магнитной системе, включая станину.

Особо следует отметить повышение технологичности конструкции электрических машин, обусловленное широкой унификацией их узлов и деталей и придание им форм, позволяющих приме-

нить прогрессивные технологические процессы и усовершенствованное оборудование — автоматические линии, агрегатные станки, полуавтоматы, конвейеры и т. п.

Наблюдаемый в настоящее время переход к прямоугольным формам очертания электрических машин нашел свое отражение в области отечественных асинхронных двигателей с высотой оси вращения $h \geq 280$ мм. Такая форма кроме эстетичности позволяет осуществить блочную конструкцию машин с коробчатой станиной, при которой блоки механической и электрической частей изготавливают на отдельных технологических участках и объединяют при сборке. При блочной конструкции обмотка сердечника статора и процесс пропитки могут производиться вне станины. Соответственно облегчается ремонт обмотки.

Основным исполнением перечисленных единичных серий электрических машин являются машины общего назначения. Под машинами общего назначения подразумеваются машины, которые могут применяться в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства, в отличие от специальных машин, предназначенных для использования в определенных специфических условиях, например взрывозащищенных, краново-металлургических, тяговых и т. п.

На базе машин общего назначения проектируют и изготавливают без значительного изменения конструкции модификации машин, обладающие несколько измененными характеристиками, которые рассчитаны на удовлетворение требований отдельных видов электроприводов. Например, у асинхронных двигателей модификациями могут быть двигатели с повышенным скольжением, многоскоростные двигатели с переключением числа полюсов и т. п.

Развитие и совершенствование конструкций электрических машин опиралось на создание классической теории электрических машин. Так теория установившихся режимов электрических машин была разработана уже к 30-м годам XX в. в трудах Э. Арнольда, А. Блонделя, М. Видмара, Л. Дрейфуса, К. А. Круга, В. С. Кулебакина, Р. Рихтера, К. И. Шенфера и других ученых.

В теорию переходных процессов электрических машин значительный вклад внесли труды ученых Б. Адкинса, Г. Вудсона, А. А. Горева, Л. Н. Грузева, Е. Я. Казовского, И. Ковача, Г. Н. Петрова, И. И. Трещева, Д. Хайта и др.

Большой вклад в развитие теории и практики электромашиностроения внесли советские и российские ученые В. П. Апаров, А. И. Бертинов, А. И. Вольдек, И. А. Глебов, А. Г. Иосифьян, В. Т. Касьянов, М. П. Костенко, И. П. Копылов, А. Н. Ларионов, Р. А. Лютер, Г. Н. Петров, Л. М. Пиотровский, И. М. Постников, Е. М. Синельников, Т. Г. Сорокер, П. С. Сергеев, Н. С. Сиунов, Г. А. Спайлов, В. А. Толвинский и многие другие.

Развитию отечественного трансформаторостроения способствовали работы Г. В. Алексенко, Ю. С. Кройгаузе, Л. В. Лейтеса, А. И. Лурье, Э. А. Машкина, А. В. Панова, С. И. Рабиновича, П. М. Тихомирова.

В конце XX в. И. П. Копылов обозначил новое направление в развитии электромеханики — космическая электромеханика — и положил начало развитию геоэлектромеханики — электромеханики планеты Земля.

1.2. Основные законы электромеханики

Работа электромеханических преобразователей (электрических машин) основана на следующих основных законах электромеханики:

- закон электромагнитной индукции, определяющий направление ЭДС в обмотках электромеханических преобразователей;
- закон магнитной цепи, определяющий распределение магнитного поля в электромеханических преобразователях;
- закон электромагнитных сил, определяющий механическое взаимодействие частей электромеханических преобразователей.

Закон электромагнитной индукции. Работа, выполняемая электрическими машинами, обусловлена взаимодействием магнитного поля и протекающего по проводу тока. Применительно к электрическим машинам этот закон удобно выразить формулой, предложенной Л. Магквеллом:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (1.1)$$

где e — ЭДС; Φ — магнитный поток.

Из формулы (1.1) следует, что ЭДС зависит только от скорости изменения магнитного потока Φ и не зависит от числа, формы и размеров проводников, из которых выполнен контур. ЭДС возникает при протекании тока по замкнутому контуру. Если контур, в котором происходит изменение магнитного потока, представляет собой сложную электрическую цепь, которую можно разбить на ряд простых контуров, и если в каждом простом контуре происходит изменение магнитных потоков $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$, то ЭДС можно представить в следующем виде:

$$e_1 = -\frac{d\Phi_1}{dt}; \quad e_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt}; \quad \dots; \quad e_n = -\frac{d\Phi_n}{dt},$$

отсюда

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_n = \sum_1^n \Phi_i = \Psi; \quad e_1 + e_2 + \dots + e_n = \sum_1^n e_i = -\frac{d\Psi}{dt},$$

где Ψ — число потокоцеплений с контуром.

В электрических машинах в большинстве случаев оказывается,

что $\Phi_1 = \Phi_2 = \dots = \Phi_n$. Тогда $e = -w \left(\frac{d\Phi}{dt} \right)$, где w — число витков, охватывающих поток Φ . Следовательно, $w\Phi = \Psi$.

Для получения явлений в электрических машинах закон Фарадея удобно записать в следующем виде:

$$e = Blv, \quad (1.2)$$

где B — магнитная индукция в данной точке поля; l — активная длина проводника в пределах равномерного магнитного поля с индукцией B , расположенного в плоскости, перпендикулярной направлению магнитных силовых линий; v — скорость движения проводника в плоскости, нормальной к B , в направлении, перпендикулярном к l .

Направление индуцированных в проводниках ЭДС определяется по правилу правой руки.

Из формулы (1.1) можно сделать следующий, важный для теории машин постоянноточа, вывод: для получения ЭДС постоянного направления необходимо изменять магнитный поток в одну сторону. Создать непрерывное изменение потока в одном направлении в течение длительного промежутка времени невозможно, т. е. нельзя получить без переключения контура постоянную ЭДС только за счет электромагнитной индукции. Из этого следует, что принципиально невозможно создать машину постоянного тока без коллектора.

Закон магнитной цепи. Законы электродинамики устанавливают связь между токами и их полем и позволяют производить расчеты их взаимодействия. Магнитное поле — часть пространства, в котором происходят физические явления, называемые магнитными явлениями. М. Фарадей представлял себе магнитное поле как пространство, с распределенными силовыми линиями, которые он называл магнитными линиями. Изображение полей при помощи магнитных линий дает большую наглядность при изучении процессов в электромеханических преобразователях. Магнитные линии могут служить не только для определения направления вектора напряженности магнитного поля, но и для определения величины этой напряженности, если измерять ее числом линий на единицу площади, взятой перпендикулярно направлению вектора напряженности.

Векторы напряженности \vec{H} и магнитной индукции \vec{B} имеют одинаковые направления в пустоте и магнитоизотропных средах. При расчете большинства задач, относящихся к электрическим машинам, ферромагнитные материалы рассматривают как парамагнитные изотропные вещества. Каждая магнитная линия представляет собой замкнутый контур, не имеющий ни начала, ни

конца. Поэтому полный магнитный поток, пронизывающий замкнутую поверхность S равен нулю, т. е.

$$\Phi = \int_S B \cos \beta dS = 0, \quad (1.3)$$

где $B \cos \beta$ — нормальная составляющая вектора магнитной индукции.

В магнитном поле можно выделить трубку магнитной индукции такого сечения, чтобы для всех точек этого сечения можно было считать напряженность H постоянной. Тогда значение элементарного магнитного потока сквозь любое сечение этой трубки будет определяться по следующей формуле:

$$\Phi = \mu HS. \quad (1.4)$$

где μ — магнитная проницаемость; S — сечение трубки.

Трубки магнитной индукции являются замкнутыми. Поэтому закон полного тока (первое уравнение Д. Максвелла в интегральной форме) можно записать в следующем виде:

$$\oint H dl = \oint H dl \cos(Hdl) = \sum i, \quad (1.5)$$

где dl — элементарное перемещение вдоль некоторого пути от точки A_1 до точки A_2 в магнитном поле; $\cos(Hdl)$ — угол между направлением перемещения и направлением магнитной силовой линии; $\sum i$ — величина полного тока, который охватывается контуром интегрирования.

Таким образом, закон магнитной цепи можно сформулировать следующим образом: интеграл по любому замкнутому контуру от произведения составляющей напряженности магнитного поля по направлению dl на dl численно равен полному току, охватываемому этим контуром.

В электрических машинах магнитный поток проходит в основном по магнитопроводу, состоящему из отдельных участков (якорь, полюсы, ярмо; или — станина, зубья, ротор и т. д.). При этом напряженность H на отдельных участках в большинстве случаев можно принимать с достаточной точностью постоянными. Тогда

$$\oint H dl = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_n l_n = \sum i. \quad (1.6)$$

Левую часть уравнения (1.6) по аналогии с электрической цепью можно назвать суммой падений магнитных напряжений в магнитной цепи и обозначить F . Часто $\sum i = iw$, где w — число витков, а i — ток в проводниках катушки. Отсюда следует, что

$$iw = F. \quad (1.7)$$

Если по всей магнитной цепи проходит одинаковый магнитный поток, то преобразуя левую часть уравнения (1.6), получаем

$$\oint H dl = \oint \frac{\Phi}{\mu S} dl = \Phi \oint \frac{dl}{\mu S} = \sum i = iw = F. \quad (1.8)$$

Тогда закон магнитной цепи аналогично закону Ома для электрической цепи можно записать в следующем виде:

$$\Phi = \frac{iw}{\oint \frac{dl}{\mu S}} = \frac{F}{\oint \frac{dl}{\mu S}} = \frac{F}{R_m}, \quad (1.9)$$

где F — полная МДС, действующая по всей магнитной цепи; R_m — полное магнитное сопротивление этой цепи.

Закон магнитной цепи, так же как и закон Ома для электрической цепи, достаточно точен для случаев, когда поперечные размеры цепи малы по сравнению с ее длиной. При сложных магнитопроводах, с которыми часто приходится сталкиваться при расчете и исследовании электрических машин, не все магнитные линии имеют одинаковую длину. Часть магнитных линий замыкается по путям рассеяния, и значения μ и S на различных участках магнитопровода различны. Поэтому величины l , μ и S для всех n элементарных потоков Φ только приблизительно можно считать одинаковыми:

$$\Phi = n\varphi = n \frac{iw}{\oint \frac{dl}{\mu S}}. \quad (1.10)$$

Для упрощения расчетов магнитную цепь разбивают по длине на несколько участков. Тогда

$$\oint \frac{dl}{\mu S} = \int \frac{dl_1}{\mu_1 S_1} + \int \frac{dl_2}{\mu_2 S_2} + \dots + \int \frac{dl_n}{\mu_n S_n}. \quad (1.11)$$

Считая с некоторым приближением $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n = \text{const}$ и $S_1, S_2, \dots, S_n = \text{const}$, получаем приближенную формулу закона магнитной цепи:

$$\oint \frac{dl}{\mu S} = \sum_1^n \frac{l_n}{\mu_n S_n}; \quad (1.12)$$

$$\Phi = \frac{iw}{\sum_1^n \frac{l_n}{\mu_n S_n}}. \quad (1.13)$$

Выражения (1.12) и (1.13) имеют приближенные значения, поэтому закон магнитной цепи нельзя полностью сравнивать с законом Ома, так как сопротивление электрической цепи не зависит от тока (если не считаться с нагреванием током), а в формуле (1.9) R_m зависит от Φ . Формулировка закона магнитной цепи в виде падения магнитного потенциала (1.6) более удобна, поскольку содержит напряженность H в общем виде.

Закон электромагнитных сил. Взаимодействие магнитного поля с контуром, по которому протекает электрический ток, создает энергию магнитного поля. Значение этой энергии можно найти из закона Ома:

$$e = iR + \frac{d\psi}{dt}, \quad (1.14)$$

Элементарную работу dA , совершаемую током в замкнутом контуре, расположенном в магнитном поле, определяют по формуле

$$dA = eidl = i^2 Rdt + id\psi, \quad (1.15)$$

Элементарная работа на изменение магнитного состояния среды $dA_m = id\psi$. Значение энергии и единицы объема (при $\mu = \text{const}$) равен

$$W'_0 = \mu \int_0^H (HdH) = \frac{\mu H^2}{2}, \quad (1.16)$$

а полная энергия во всем объеме —

$$W = \int \frac{\mu H^2}{2} dv = \frac{Li^2}{2}. \quad (1.17)$$

В выражении (1.17) $Li = \Psi$ представляет собой полное потоко-сцепление с контуром тока i . Всякое изменение потоко-сцепления Ψ приводит к электромагнитной реакции в виде возникновения ЭДС самоиндукции e_L и вызванного ею тока i . Любая электромагнитная система в силу наличия электромагнитной инерции стремится удерживать на определенном уровне сцепленный с контуром магнитный поток.

Во всех электромагнитных устройствах существуют как минимум два электромагнитосвязанных контура. Электромагнитная энергия двух контуров описывается следующим выражением:

$$W_{12} = \int \frac{\mu H^2}{2} dv = \frac{L_1 i_1^2}{2} + \frac{L_2 i_2^2}{2} + M_{12} i_1 i_2. \quad (1.18)$$

Индуктивности L_1 и L_2 контуров обычно не зависят от их взаимного расположения. Взаимноиндуктивность M_{12} зависит от относительного расположения контуров. Поэтому их взаимное переме-

шение при постоянстве токов и контурах приводит к изменению связанной с контурами энергии W_{12} и, следовательно, указывает на наличие сил механического взаимодействия.

Если обозначить взаимное расположение контуров координатой x , то электромагнитную силу F_x можно представить в следующем виде:

$$F_x = \frac{dW_{12}}{dx} = i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{dx}. \quad (1.19)$$

Электромагнитные силы стремятся так изменить взаимное расположение контуров, чтобы увеличить поток взаимной индукции и тем самым при неизменных токах увеличить энергию системы.

При расчетах электрических машин удобнее пользоваться выражением, позволяющим определить электромагнитную силу, действующую на отдельный элемент контура. Если элемент проводника dl какого-либо контура с током i находится в магнитном поле и перемещается на величину dx , то образуются приращение потока

$$d\Phi = B \cos \alpha \, dl dx = B \sin \varphi \, dl dx, \quad (1.20)$$

где α — угол между направлением магнитного поля и направлением действия силы; φ — угол между направлением магнитного потока и тока i .

Значение элементарной электромагнитной силы, действующей на участок dl , рассчитывают по формуле

$$dF_x = i \frac{d\Phi}{dx} = Bi \sin \varphi \, dl. \quad (1.21)$$

Сила, действующая на проводник длиной l , равна

$$F_x = \int_0^l Bi \sin \varphi \, dl. \quad (1.22)$$

Если магнитное поле однородно и проводник прямолинейен, то

$$F_x = Bli \sin \varphi. \quad (1.23)$$

Таким образом, в электромеханических устройствах возникают электромагнитные силы, стремящиеся создать такие движения контуров, при которых внешний поток, связанный с каждым из составляющих систему контуров, мог бы получить положительное приращение в случае постоянства всех токов.

На основе закона электромагнитных сил можно сформулировать принцип обратимости электрических машин. Любая электрическая машина обратима, т.е. может работать генератором или двигателем. Если к валу машины подвести механическую энергию, то

в машине она может быть преобразована в энергию электрического тока. Если же обмотку той же машины питать электрическим током, то энергия тока при определенных условиях будет преобразовываться в машине в механическую энергию вращения. Таким образом, каждый электромеханический преобразователь может изменить направление преобразуемой им энергии. Это свойство называется *обратимостью* электрических машин.

Для уяснения принципа обратимости рассмотрим простейшую электрическую машину, состоящую из проводника, помещенного в магнитное поле. Приложим к проводнику силу и начнем передвигать его в магнитном поле в направлении, перпендикулярном вектору индукции \vec{B} , с постоянной скоростью v . Тогда с учетом рассмотренных ранее основных законов электромеханики наведенная в проводнике ЭДС будет равна:

$$e = Blv. \quad (1.24)$$

Если проводник замкнуть на внешнее сопротивление, то по нему потечет ток i в направлении, определяемым правилом правой руки. Получился элементарный генератор. При протекании по проводнику тока i на проводник будет действовать электромагнитная сила

$$F_1 = Bil, \quad (1.25)$$

направленная против движения проводника (правило левой руки).

При равномерном движении проводника внешняя сила, приложенная к проводнику F_2 , должна быть равна электромагнитной силе F_1 , т.е.

$$F_2 = F_1, \quad (1.26)$$

а развиваемая ею мощность —

$$F_2 v = F_1 v. \quad (1.27)$$

Подставляя в правую часть последнего равенства вместо F_1 и v их значения, получаем

$$F_2 v = Bilv = ei. \quad (1.28)$$

Из этого равенства следует, что в генераторе подводимая извне механическая мощность преобразуется в мощность электрического тока.

Если внешнюю силу к проводнику не прикладывать и пропустить через него ток от постороннего источника, то на проводник будет действовать электромагнитная сила F_1 , под действием которой проводник будет перемещаться в магнитном поле в направлении, обратном его движению при работе генератора. В этом случае проводник можно рассматривать как элементарный электродвигатель. Электрическая мощность, подводимая извне к такому

двигателю, будет равна ei . Приложенное к нему напряжение u должно быть уравновешено наводимой в проводнике ЭДС e и падением напряжения в его сопротивлении R :

$$u = e + iR. \quad (1.29)$$

Мощность, потребляемая двигателем из сети, определяется выражением

$$ui = ei + i^2 R, \quad (1.30)$$

или

$$ui = Blvi + i^2 R,$$

или

$$ui = F_1 v + i^2 R.$$

Из этих равенств следует, что электрическая мощность, потребляемая двигателем из сети, частично преобразуется в механическую мощность, развиваемую двигателем, а частично расходуется на покрытие электрических потерь в нем.

1.3. Классификация электрических машин

Электрические машины широко применяются во всех сферах человеческой деятельности и их номенклатура весьма разнообразна. Электрические машины можно классифицировать по разным признакам.

Классификация по роду тока. По роду тока различают электрические машины переменного и постоянного тока.

Если классифицировать электрические машины с этапа получения электрической энергии, то первыми будут *синхронные машины*. Их применяют в качестве генераторов переменного тока на электрических станциях. Как автономные источники питания повышенной частоты синхронные генераторы используют на кораблях, самолетах, в лесной промышленности и т.п. Синхронные машины применяют также в качестве синхронных компенсаторов. Синхронные машины малой мощности нашли широкое применение в системах автоматики — реактивные двигатели, с постоянными магнитами, гистерезисные, шаговые, индукторные, сельсинны и др.

Для передачи на большие расстояния энергии, выработанной на электрических станциях, а также для других целей применяют *трансформаторы*. Их используют для преобразования напряжения в системах передачи и распределения электрической энергии, выпрямительных установках, устройствах связи, автоматики и вычислительной техники, а также при электрических измерениях (измерительные трансформаторы) и функциональных преобразованиях (вращающиеся трансформаторы).

Асинхронные машины широко применяют в качестве электродвигателей в различных отраслях техники благодаря простоте их устройства, относительно низкой стоимости и высокой надежности. В системах автоматического регулирования используют одно- и двухфазные управляемые асинхронные двигатели, асинхронные тахогенераторы и др.

Коллекторные машины переменного тока используют сравнительно редко, поскольку они имеют сложную конструкцию и требуют тщательного ухода. Значительно шире применяют универсальные коллекторные двигатели, работающие как на постоянном, так и на переменном токе. Их используют в различных бытовых приборах и в устройствах автоматики.

Машины постоянного тока применяют в качестве генераторов и двигателей в устройствах, требующих регулирования частоты вращения в широких пределах: транспорт (железнодорожный и морской), прокатные станы, электроприводы больших транспортных автомобилей, грузоподъемные и землеройные машины, сложные металлообрабатывающие станки и др.

Двигатели постоянного тока применяют также в устройствах, в которых источниками для питания двигателей служат аккумуляторные батареи (стартерные двигатели, двигатели подводных лодок, космических кораблей и т.п.)

В системах автоматического регулирования машины постоянного тока нашли широкое применение и в качестве электромашинных усилителей, исполнительных двигателей и тахогенераторов.

Классификация по назначению. Электрические машины по назначению можно разделить на следующие виды:

- *генераторы*, преобразующие механическую энергию в электрическую. Их устанавливают на электрических станциях и различных транспортных устройствах: автомобилях, самолетах, теплоходах, кораблях, перемещаемых электростанциях и др. На электростанциях они приводятся во вращение с помощью мощных паровых или гидравлических турбин, а на транспортных установках — от двигателей внутреннего сгорания и газовых турбин. Генераторы используют также и в качестве источников питания в установках связи, устройствах автоматики, измерительной техники и др.

- *двигатели*, преобразующие электрическую энергию в механическую. Их используют для вращения различных машин, механизмов и устройств, применяемых в промышленности, в сельском хозяйстве, связи, на транспорте, в военном деле и быту. В современных системах автоматического управления они нашли применение и в качестве исполнительных регулирующих и программирующих органов;

- *преобразователи*, преобразующие переменный ток в постоянный и, наоборот, изменяющие значение напряжения постоянного и переменного тока, частоту, число фаз и др. Их широко ис-

пользуют в промышленности, на транспорте и в военном деле. В последнее время роль электромашинных преобразователей существенно снизилась вследствие применения статических полупроводниковых преобразователей;

- *компенсаторы* осуществляют генерирование реактивной мощности в электрических установках для улучшения энергетических показателей источников и приемников электрической энергии;

- *усилители* используются для управления объектами относительно большой мощности посредством сигналов малой мощности, подаваемых на их обмотки возбуждения (управления). Потребление этих усилителей в последнее время снижается. Это обусловлено применением усилителей, выполненных на полупроводниковых элементах (транзисторах, тиристорах);

- *электромеханические преобразователи сигналов*, генерирующие, преобразующие и усиливающие различные сигналы. Они имеют вид электрических микромашин и широко используются в системах автоматического регулирования, в измерительных и счетно-решающих устройствах в качестве различных датчиков, дифференцирующих и интегрирующих элементов, сравнивающих и регулирующих органов и др.

Классификация электрических микромашин автоматических устройств. Различают следующие микромашины автоматических устройств:

- *силовые микродвигатели*, приводящие во вращение различные механизмы автоматических устройств самоиндуцируемых приборов и др.;

- *управляемые (исполнительные) двигатели*, преобразующие поданный к ним электрический сигнал в механическое перемещение вала, т.е. отрабатывающие определенные команды;

- *тахогенераторы*, преобразующие механическое вращение вала в электрический сигнал — напряжение, пропорциональное частоте вращения вала;

- *вращающиеся трансформаторы*, выдающие на выходе напряжение, пропорциональное той или иной функции угла поворота ротора, например синусу или косинусу этого угла либо самому углу;

- *машины синхронной связи* (сельсены, магнелены), осуществляющие синхронный и синфазный поворот или вращение механически не связанных между собой осей;

- *микромашины гироскопических приборов* (гироскопические двигатели, датчики угла, датчики момента), осуществляющие вращение роторов гироскопов с высокой частотой и коррекцию их положения.

Классификация по мощности. По мощности электрические машины можно разделить на микромашины, машины малой, средней и большой мощности.

Микромашины имеют мощность от долей ватта до 500 Вт. Они работают на постоянном или на переменном токе промышленной (50 Гц) или повышенной частоты (400... 2000 Гц).

Машины малой мощности — от 0,5 до 10 кВт. Работают на постоянном или на переменном токе 50 Гц или повышенной частоты.

Машины средней мощности — от 10 кВт до нескольких сотен киловатт на постоянном или переменном токе промышленной частоты, а для трансформаторов — до 1000 кВ·А.

Машины большой мощности — свыше нескольких сотен киловатт на постоянном или переменном токе 50 Гц.

Классификация по частоте вращения. По частоте вращения электрические машины можно подразделить: на тихоходные — с частотами вращения до 300 мин⁻¹; средней быстроходности — 300... 1500 мин⁻¹; быстроходные — 1500... 6000 мин⁻¹; сверхбыстроходные — свыше 6000 мин⁻¹.

Микромашины выполняют для частот вращения от нескольких оборотов в минуту до 6000 мин⁻¹; машины большой и средней мощности — обычно до 3000 мин⁻¹.

1.4. Стандартизация в области электромашиностроения

Одна из важнейших задач народного хозяйства — улучшение качества продукции — неразрывно связана с уровнем стандартизации. Основные технические требования к конструктивным исполнениям, размерам и параметрам, методам и средствам испытаний электрических машин, а также требования к материалам и полуфабрикатам, необходимым для их производства, устанавливаются и определяются стандартами.

Большим резервом повышения экономической эффективности народного хозяйства является дальнейшее развитие внешних экономических отношений, расширение выпуска изделий, в том числе электрических машин на экспорт. В связи с этим все большее внимание уделяется согласованию на международной основе требований национальных стандартов. Международное сотрудничество в области стандартизации играет важную роль в устранении технических барьеров во внешней торговле и в установлении международных научно-технических связей в электромашиностроении.

К основным международным организациям в области стандартизации по электротехнике, участником которых является Россия, относятся Международная организация по стандартизации (ИСО) и Международная электротехническая комиссия (МЭК). Вопросами разработки рекомендаций занимаются технические комитеты, подготовительные подкомитеты и создаваемые в них

рабочие группы. Комитеты ИСО занимаются тематикой, охватывающей отдельные системы и даже отрасли, которые включают в себя также и вопросы электротехники, в то время как комитеты МЭК образованы главным образом для рассмотрения тех или иных видов электротехнического оборудования. В частности, Комитет № 2 занимается вопросами вращающихся электрических машин всех мощностей и габаритных размеров (за исключением тяговых электродвигателей).

Международные рекомендации разрабатывают по отдельным видам изделий и материалов, по терминологии, условным обозначениям, графическим изображениям и т.п. Рекомендации носят факультативный характер, т.е. их применение в национальной практике отдельных стран не обязательно. Однако в настоящее время практически все национальные стандарты по электрическим машинам создаются с учетом или непосредственно на базе рекомендаций ИСО и МЭК. Начиная с 1972 г. ИСО выпускает международные стандарты.

Важное значение стандарты ИСО и рекомендации МЭК имеют при решении ряда определяющих положений при проектировании электрических машин. К ним относится классификация номинальных режимов работы электрических машин (при кажущемся их многообразии). Не менее важно, чтобы применяемые для единичных серий электрических машин шкалы мощностей соответствовали ряду мощностей, рекомендованному МЭК. Значения номинальных напряжений, на которые должны проектироваться электрические машины, также должны соответствовать международным стандартам. ИСО стандартизировала номинальные частоты вращения для двигателей и генераторов, которые важно соблюдать в национальных стандартах.

Номинальные режимы работы. Номинальные данные электрических машин должны соответствовать определенному режиму работы. Стандарт предусматривает режимы работы с условными обозначениями S1—S8. Наиболее распространен продолжительный номинальный режим работы, который характеризуется продолжительностью работы машины, достаточной для достижения установившейся температуры всех частей электрической машины при неизменной внешней нагрузке, — условное обозначение S1.

Номинальные мощности. Номинальные мощности электрических машин переменного и постоянного тока (двигателей и генераторов) регламентированы стандартом, в котором учтены рекомендации и Публикации МЭК — 72 в части номинальных мощностей. Согласно стандарту номинальные мощности должны соответствовать работе электрических машин при номинальных значениях напряжения, частоты вращения, частоты переменного тока, коэффициента мощности, а также при условиях и режимах работы, установленных соответствующими стандартами.

Стандартом предусмотрены следующие значения номинальных мощностей (в пределах от 0,12 до 1 000 кВт): 0,12; 0,18; 0,25; 0,37; 0,55; 0,75; 1,1; 1,5; 2,2; 3,0; 4,0; 5,5; 7,5; 11; 15; 18,5; 22; 30; 37; 45; 55; 75; 90; 110; 132; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1 000 кВт. Эти значения мощностей обязательны для всех исполнений электрических машин по защите и по монтажу, а также для всех способов охлаждения.

Для машин специализированного назначения (рольганговые, краново-металлургические и др.) указанные значения мощностей не обязательны.

Номинальные напряжения. Номинальные напряжения генераторов и двигателей регламентированы стандартами. В стандартах учтены Публикации МЭК—38.

Стандартом установлены следующие наиболее используемые номинальные напряжения (В):

	Генератор	Двигатель
Переменный		
трехфазный ток.....	230, 400, 690, 6 300.	220, 380, 660, 6 000.
.....	10 500	10 000
Постоянный ток	115, 230, 460	110, 220, 440

Номинальные частоты вращения. Номинальные частоты вращения электрических машин регламентированы стандартами. Установлены следующие номинальные частоты вращения при частоте переменного тока 50 Гц для синхронных генераторов: 125; 150; 157,6; 214,3; 250; 300; 375; 428,6; 500; 600; 750; 1 000; 1 500; 3 000 мин⁻¹. Эта шкала используется также для синхронных и асинхронных двигателей с некоторыми изменениями.

Так, для синхронных двигателей дополнительно включены частоты вращения 100 и 166,6 мин⁻¹, а исключена частота вращения 428,6 мин⁻¹; для асинхронных двигателей добавлены частоты вращения 120 и 166 мин⁻¹, а исключены 214,3 и 428,6 мин⁻¹. Номинальные частоты вращения асинхронных двигателей должны быть меньше перечисленных на частоту вращения, определяемую величиной номинального скольжения.

Для генераторов постоянного тока стандартом установлены следующие номинальные частоты вращения: 400; 500; 600; 750; 1 000; 1 500; 2 000; 3 000 мин⁻¹, для двигателей: 25; 50; 75; 100; 125; 150; 200; 300; 400; 500; 600; 750; 1 000; 1 500; 2 000; 2 200 и 3 000 мин⁻¹. Наименьшие частоты вращения двигателей (с регулированием частоты вращения изменением поля главных полюсов) и наибольшие частоты вращения двигателей (с регулированием частоты вращения изменением напряжения на якоре при номинальном напряжении и номинальной нагрузке на валу) должны соответствовать указанным номинальным частотам вращения двигателей.

Стандартом также установлены допускаемые отклонения номинальной частоты вращения двигателей и генераторов постоянного тока.

Степени защиты от внешних воздействий. Электрические машины могут иметь различные исполнения по защите от внешних воздействий, которые, с одной стороны, должны обеспечить защиту обслуживающего персонала от прикосновения к токоведущим или вращающимся частям, а с другой — защиту машины от попадания внутрь ее твердых посторонних тел и воды. Обозначения степени защиты регламентированы стандартом. В стандарте учтены требования рекомендаций Публикации МЭК 34—5.

Согласно указанному стандарту обозначение степеней защиты состоит из букв IP — начальные буквы английских слов International Protection (международное обозначение степеней защиты) и следующих за ними цифр. Первая цифра характеризует степень защиты от прикосновения и проникновения твердых тел в машину. Более распространенными являются следующие степени защиты (по первой характеристической цифре):

2 — защита от возможности соприкосновения пальцев с токоведущими или движущимися частями внутри машины. Защита машины от попадания внутрь ее твердых посторонних тел диаметром более 12 мм;

4 — защита от соприкосновения инструмента, проволоки или других подобных предметов, толщина которых превышает 1 мм, с токоведущими или движущимися частями внутри машины. Защита машины от попадания внутрь ее легких твердых посторонних тел диаметром более 1 мм.

Вторая цифра характеризует степень защиты машины от проникновения воды. Более распространенными являются следующие степени защиты:

2 — защита от капель воды. Капли воды, падающие под углом в пределах до 15° к вертикали, не должны оказывать на машину вредного действия;

3 — защита от дождя. Вода, падающая на машину в виде дождя под углом в пределах до 60° к вертикали, не должна оказывать на машину вредного действия;

4 — защита от брызг. Брызги воды любого направления, попадающие на машину, не должны оказывать на нее вредного действия.

Наибольшее применение находят следующие степени защиты:

IP22 — машина, защищенная от попадания твердых тел размером более 12 мм и от капель воды (защищенная машина);

IP23 — машина, защищенная от попадания твердых тел размером более 12 мм и от дождя (защищенная машина);

IP44 — машина, защищенная от попадания твердых тел размером более 1 мм и от водяных брызг (закрытая машина).

Способы охлаждения. Обозначения способов охлаждения регламентированы стандартом, учитывающим рекомендации Публикации МЭК 34—6. Согласно этому стандарту обозначение способов охлаждения состоит из букв IC — начальные буквы английских слов International, Cooling (международное обозначение способов охлаждения) и следующей за ними характеристики цепей охлаждения. Последняя состоит из прописной буквы, условно обозначающей вид хладагента и следующих за ней двух цифр; при охлаждении воздухом буква опускается. Первая цифра условно обозначает устройство цепи для циркуляции хладагента, вторая — способ его перемещения. Из указанных в стандарте более распространенными являются следующие условные обозначения цепей:

• *условные обозначения устройства цепи (первая цифра):*

0 — свободная циркуляция;

1 — охлаждение с помощью подводящей трубы;

3 — охлаждение с помощью подводящей и отводящей труб;

4 — охлаждение с помощью наружной поверхности машины;

5 — охлаждение с помощью встроенного охладителя (с использованием окружающей среды);

6 — охлаждение с помощью пристроенного охладителя (с использованием окружающей среды);

• *условные обозначения способа передвижения хладагента (вторая цифра):*

0 — свободная конвекция;

1 — самовентиляция;

3 — перемещение хладагента с помощью пристроенного зависимого устройства;

5 — перемещение хладагента с помощью встроенного независимого устройства;

6 — перемещение хладагента с помощью пристроенного независимого устройства;

7 — перемещение хладагента с помощью отдельного и независимого устройства.

Если машина имеет две или более цепей охлаждения, то в обозначении указывают характеристики всех цепей охлаждения начиная с характеристики цепи со вторичным хладагентом (с более низкой температурой). Чаще применяют следующие способы охлаждения:

IC01 — защищенная машина с самовентиляцией; вентилятор расположен на валу машины;

IC0141 — закрытая машина, обдуваемая наружным вентилятором, расположенным на валу машины;

IC0641 — закрытая машина, обдуваемая наружным пристроенным вентилятором с приводным электродвигателем, установленным на машине и питаемым независимо от охлаждаемой машины;

IC0041 — закрытая машина с естественным охлаждением;

IC0151 — закрытая машина с охлаждением с помощью встроенного охладителя (с использованием окружающей среды);

IC0161 — закрытая машина с охлаждением с помощью пристроенного охладителя (с использованием окружающей среды);

IC13 — защищенная машина с независимой вентиляцией; охлаждение с помощью подводящей трубы, осуществляемое пристроенным зависимым устройством;

IC17 — защищенная машина с независимой вентиляцией; охлаждение с помощью подводящей трубы, осуществляемое отдельным и независимым устройством;

IC05 — то же, охлаждение с помощью встроенного вентилятора с приводным электродвигателем, установленным на машине и питаемым независимо от охлаждаемой машины;

IC06 — то же, охлаждение с помощью пристроенного двигателя-вентилятора, питаемого независимо от охлаждаемой машины;

IC37 — закрытая машина с независимой вентиляцией; охлаждение с помощью подводящей и отводящей труб, осуществляемое отдельным и независимым устройством.

Исполнения по способу монтажа. Формы исполнения по способу монтажа и их условные обозначения регламентируются Публикацией МЭК 34—7. Обозначение формы исполнения по способу монтажа состоит из букв IM — начальные буквы английских слов International, Mounting (международное обозначение исполнений по способу монтажа) и следующих за ними четырех цифр. Первая цифра обозначает группу конструктивного исполнения, например цифра 1 — машину на лапах с одним или двумя подшипниковыми щитами; 2 — то же, с фланцем на подшипниковом щите (или щитах); 3 — машину без лап с одним или двумя подшипниковыми щитами, с фланцем на одном подшипниковом щите и т.д.

Вторая и третья цифры обозначают способ монтажа, например при группе конструктивного исполнения 1 цифры 00 — машину с горизонтально направленным концом вала и креплением к фундаменту лапами, 01 — с вертикально направленным концом вала вниз и креплением к стене лапами; при группе 3 цифры 01 соответствуют вертикально направленному концу вала вниз и креплению к фундаменту фланцем и т.д. Четвертая цифра обозначает исполнение вала, например цифра 1 — машину с одним цилиндрическим концом вала; 2 — то же, с двумя цилиндрическими концами вала и т.д.

Наиболее распространенными исполнениями по способу монтажа являются:

• IM1001 — машина с двумя подшипниковыми щитами на лапах, с одним горизонтально направленным цилиндрическим концом вала;

• IM1011 — то же, с вертикально направленным вниз одним цилиндрическим концом вала;

- IM3011 — машина с двумя подшипниковыми щитами без лап, с фланцем на одном подшипниковом щите, с вертикально направленным вниз одним цилиндрическим концом вала.

Полный перечень условных обозначения для возможных конструктивных исполнений машин по способу монтажа приведен в стандарте.

Климатические условия работы. Конструкция и исполнение машин должны предусматривать способность противостоять в условиях эксплуатации воздействию климатических факторов внешней среды. Стандарты регламентируют исполнение машин, категории их размещения, условия эксплуатации, хранения и транспортирования с учетом воздействия климатических факторов (температуры, влажности, пыли, солнечной радиации, интенсивности дождя и т.п.).

Каждому климатическому исполнению машин присвоено буквенное обозначение, например для районов с умеренным климатом — У, с холодным климатом — ХЛ и т.д.

Категория размещения машин имеет цифровое обозначение, например при наиболее благоприятных условиях, когда машина предназначена для установки в закрытых отапливаемых и вентилируемых производственных или других помещениях, категория размещения обозначается цифрой 4; категория размещения машины, предназначенной для работы в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий, обозначается цифрой 3.

Цифровое обозначение категории размещения следует за буквенным, характеризующим условия климата. Например, исполнение машины, предназначенной для районов с умеренным климатом при категории размещения 4, имеет условное буквенно-цифровое обозначение У4.

Установочные и присоединительные размеры. Высоты оси вращения h электрических машин с горизонтальной осью вращения, равные расстоянию от оси вращения до опорной плоскости машины, регламентированы стандартом, который соответствует рекомендациям, Публикациям МЭК—72, МЭК—72А и ИСО Р496.

К каждому значению h привязаны определенные установочные и присоединительные размеры, регламентированные стандартом для $h = 56...400$ мм и для $h > 400$ мм. Эти стандарты соответствуют рекомендациям Публикаций МЭК—72, МЭК—72А и ИСО Р775.

1.5. Материалы, применяемые в электромашиностроении

Электроизоляционные материалы. Улучшение технико-экономических показателей электрических машин в значительной степени определяется применением усовершенствованных материалов,

в том числе электроизоляционных. Главными требованиями, предъявляемыми к электроизоляционным материалам, являются: надлежащая нагревостойкость, электрическая, механическая прочность и как можно меньшая толщина.

Развитие электромашиностроения в течение последних десятилетий сопровождается повышением нагревостойкости используемых электроизоляционных материалов. Электрические машины с изоляцией класса нагревостойкости А в настоящее время практически не изготавливаются, а электроизоляционные материалы класса Е находят ограниченное применение в малых машинах. Конструкция электроизоляции современных электрических машин базируется главным образом на материалах классов нагревостойкости В и F. Специальные машины и машины, работающие в относительно тяжелых условиях (металлургия, шахты и т.п.), выполняют с электроизоляционными материалами класса нагревостойкости H.

По назначению электроизоляционные материалы подразделяют: на материалы, к которым предъявляют в первую очередь требования высокой электрической прочности, например материалы, изолирующие катушки обмоток; материалы, которые должны защищать основные электроизоляционные материалы от механических воздействий, например материалы для выкладки пазов. К таким материалам прежде всего предъявляют требования высокой механической прочности.

В зависимости от структуры различают электроизоляционные материалы следующих основных групп:

- неорганические волокнистые материалы, основой которых является стекловолокно или асбест. Стекловолокнистые материалы обладают большой механической прочностью на разрыв, малой гигроскопичностью и высокой нагревостойкостью, класс которой определяется пропитывающими лаками. Недостатком стекловолокнистых материалов является их пониженная стойкость к изгибу и истиранию. Асбест используют в виде асбестовой бумаги, обладающей высокой нагревостойкостью, но имеющей низкую механическую прочность на разрыв;

- слюдяные материалы, основой которых являются шепаная или дробленая слюда, обладают высокими показателями по электрической и механической прочности, нагревостойкости, влагостойкости. Различают три основных вида слюдяных материалов — миканиты, слюдиниты и слюдопласты. Последние два вида находят все большее распространение, вытесняя миканиты, для изготовления которых необходима дефицитная шепаная слюда;

- пленочные и бумажные изоляционные материалы из синтетических смол, находящиеся в стадии разработки и улучшения. Эти материалы обладают высокими нагревостойкостью, электрической и механической прочностью при малой толщине; они пер-

Таблица 1.1

Группа материалов	Наименование материала	Класс нагревостойкости
Неорганические волокнистые	Стеклолакоткань	В, F, Н
	Лента стекляннная	В, F, Н
	Лента нетканая стекловолокнистая	В, F
	Бумага асбестовая	В, F
Слюдяные	Микалента	В, F, Н
	Миканит прокладочный	В, F, Н
	Миканит формовочный	В, F, Н
	Миканит коллекторный	В, F, Н
	Лента стеклослюдинитовая	В, F
	Слюдопластофольи	В
Синтетические пленки и бумаги	Лента полиамидная	F, Н
	Пленкосинтокартон	В, F, Н
	Пленкостеклопласт «Изофлек»	В
	Пленкостеклопласт «Имидофлек»	F, Н
Вспомогательные	Стеклотекстолит	В, F, Н
	Электронит	В, F
	Бумага телефонная	В
	Пластмасса К6	В
	Пластмасса АГ4С	F

спективны для применения в современных электрических машинах. К этой группе материалов относятся, кроме указанных в табл. 1.1, также фенилоновая бумага и синтофольи классов нагревостойкости F и H;

- вспомогательные материалы, используемые для механического крепления обмоток или отдельных сборочных единиц электрических машин.

Проводниковые материалы. Для обмоток электрических машин применяют в основном медные провода, изолированные стекловолокном или эмалью, а также неизолированные медные ленты и шины, дополнительно изолируемые при изготовлении обмоток.

Из проводов со стекловолокнистой изоляцией распространены круглые и прямоугольные провода марок ПСД и ПСДТ класса нагревостойкости F, а также провода ПСДК и ПСДКТ класса нагревостойкости H. Буква Т в конце обозначения марки провода указывает на утонченную изоляцию провода.

Из проводов с эмалевой изоляцией используют главным образом круглые провода марки ПЭТВ и прямоугольные марки ПЭТВП; нагревостойкость изоляции этих проводов соответствует классу В. Для обмоток электрических машин с изоляцией класса нагрево-

стойкости F применяют круглые провода ПЭТ-155 и прямоугольные ПЭТП-155, а при классе нагревостойкости H — круглые провода ПЭТ-200 и прямоугольные провода ПЭТП-200.

По сравнению с проводами, изолированными стекловолокном, эмалированные провода обладают рядом преимуществ — меньшей толщиной, большей теплопроводностью и влагостойкостью изоляции. Вместе с тем они имеют пониженную стойкость к тепловым ударам и к действию растворителей. Несмотря на указанные недостатки эмалированные провода постепенно вытесняют провода со стекловолокнистой изоляцией.

Для выводов электрических машин при изоляции классов нагревостойкости В, F и H применяют в основном кабель РКГМ, обладающий гибкостью, так как его жила состоит из тонких медных проволок, а изоляция эластична.

Для литой «беличьей клетки» короткозамкнутых роторов используют алюминий А5 или алюминиевый сплав АКМ12-4 (в клетках роторов асинхронных двигателей с повышенным скольжением), для сварной — прямоугольные алюминиевые прессованные шины АД0.

Неизолированные медные провода (ленты и шины) применяют для обмоток возбуждения синхронных машин, обмоток добавочных полюсов и последовательных обмоток главных полюсов машин постоянного тока. Для демпферных обмоток синхронных машин используют медные круглые стержни.

Коллекторные пластины выполняют из холоднокатаной коллекторной меди либо (в быстроходных машинах) из кадмиевой коллекторной меди, которая обладает большей механической прочностью и меньшим износом на истирание.

Электротехнические стали. Для листов сердечников электрических машин используют тонколистовую электротехническую сталь. Обозначение марок стали по стандарту состоит из четырех цифр, условно характеризующих основные свойства стали: первая — класс по структурному состоянию и виду проката (1 — горячекатаная изотропная, 2 — холоднокатаная изотропная, 3 — холоднокатаная анизотропная с ребровой текстурой); вторая — содержание кремния (0 — нелегированная, 1 — с содержанием кремния свыше 0,4 до 0,8 % включительно, 2 — свыше 0,8 до 1,8 % включительно, 3 — свыше 1,8 до 2,8 % включительно, 4 — свыше 2,8 до 3,8 % включительно, 5 — свыше 3,8 до 4,8 % включительно); третья — по основной нормируемой характеристике (например, удельные потери при магнитной индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц, обозначаемые в стандарте $p_{1,5/50}$); четвертая — порядковый номер типа стали.

Раньше для сердечников, подвергающихся перемагничиванию (статор, ротор, якорь), применялась горячекатаная изотропная электротехническая сталь 1212, 1312 и 1412, поставляемая в виде

листов стандартных размеров. В последние годы эта сталь вытесняется освоенной производством холоднокатаной изотропной электротехнической сталью, обладающей более высокой магнитной проницаемостью, пониженными удельными потерями при перемагничивании, малыми разнотолщи́нностью и разноплоскостностью в сравнении с горячекатаной сталью. При толщине листов 0,5 мм коэффициент заполнения сердечников, собираемых из холоднокатаной стали, повышается до 0,97. Холоднокатаная сталь поставляется также в рулонах и резаных лентах, что позволяет внедрять на электромашиностроительных заводах автоматический процесс штамповки.

Согласно стандарту рулонную сталь изготавливают шириной 500, 530, 600, 670, 750, 860 и 1000 мм. При относительно небольшом выпуске проектируемых машин выбор наружных диаметров сердечников статора машин переменного тока и якоря машин постоянного тока следует ориентировать на рулонную сталь стандартной ширины, учитывая при этом минимально допустимые припуски на штамповку.

Резаную ленту изготавливают шириной 90, 95, 107, 123, 138, 140, 150, 156, 160, 170, 175, 187, 200, 215, 226, 233, 250, 260, 280, 300, 322, 325, 360, 400, 445 и 500 мм, однако по соглашению потребителя с изготовителем допускается изготавливать ленту другой ширины. Поэтому при больших количествах выпускаемых машин целесообразно ориентироваться на применение резаных лент шириной, необходимой для обеспечения оптимальных показателей проектируемых машин. Листы изготавливают нескольких размеров: 500×1500, 750×1500 и 1000×2000 мм.

Чем больше мощность электрической машины, тем выше отношение потерь в стали к сумме потерь в машине. Чтобы это отношение не превышало определенного, установленного практикой предела (обычно около 0,25), для машин большей мощности применяют сталь с меньшими удельными потерями.

Холоднокатаная изотропная сталь для стабилизации магнитных свойств после проката требует термической обработки (отжига), осуществляемой на металлургических заводах. Стандартом предусмотрено также изготовление указанной стали с термостойким электроизоляционным покрытием. Исключением является сталь 2013, которая поставляется без термической обработки, так как из-за высокой пластичности в отожженном состоянии при штамповке образуются большие заусенцы. Поэтому отштампованные листы из стали 2013 должны подвергаться термообработке на электромашиностроительном заводе в специальных печах в защитной атмосфере, а затем окисидированию в атмосфере водяного пара или воздуха для получения на поверхности листов изоляционного слоя.

Для шихтованных сердечников полюсов, не подверженных периодическому перемагничиванию, используют холоднокатаную

анизотропную сталь. Рулонную сталь изготавливают шириной 750, 860 и 1000 мм, резаную ленту — шириной 170, 180, 190, 200, 240, 250, 300, 325, 360, 400, 465 и 500 мм, однако по соглашению потребителя с изготовителем допускается другая ширина. Листы изготавливают следующих размеров: 750×1500, 860×1500 и 1000×2000 мм.

Щетки. Для обеспечения надежной работы элементов скользящего контакта электрических машин большую роль играют параметры щеток. Различают три основные группы щеток: графитные, изготавливаемые из сажи, нефтяного и пекового кокса, графита (естественного); электрографитированные, изготавливаемые аналогично графитным, но с дополнительным процессом обжига при высокой температуре (электрографитирование); металлографитные, в которых металлический порошок (в основном медный) смешан с графитом.

У перечисленных групп щеток к основным материалам добавляются связующие, которые придают пластичность мелкозернистому сырьевому материалу, в результате чего его можно прессовать в виде пластин; затем пластины прокаливают без доступа воздуха до спекания. Отдельные группы щеток обладают разными физическими свойствами. Стандарты устанавливают характеристики разных марок щеток, а также типы и размеры щеток.

Для контактных колец машин переменного тока используют главным образом металлографитные, а для коллекторов машин постоянного тока — графитные и электрографитированные щетки.

Конструкционные материалы. Для литых станин машин переменного тока, подшипниковых щитов, нажимных шайб роторов и якорей, а также других деталей, к которым не предъявляется требование высокой механической прочности, применяют серый чугун СЧ 12-28 и СЧ 15-32. При повышенном требовании к механической прочности литых деталей может использоваться ковкий чугун КЧ 37-12 или сталь 25Л и 35Л.

Для изготовления валов и втулок применяют в основном прокатанную сталь 45 круглого поперечного сечения. Тонколистовой прокат используют для защитных кожухов наружных вентиляторов, жалюзи, распорок между пакетами сердечников и нажимными шайбами ротора и якоря, деталей вентиляторов, направляющих воздух щитков и др. Толстолистовой прокат применяют для изготовления станин машин постоянного тока, также — для станин и подшипниковых щитов машин переменного тока в сварном исполнении. Для станин машин постоянного тока с $h \leq 200$ мм применяют также цельнотянутые сварные трубы. Стальные поковки используют для изготовления коллекторных нажимных конусов и контактных колец фазных роторов.

Для уменьшения массы машин небольшой мощности для подшипниковых щитов, подшипниковых крышек, а также станин

асинхронных двигателей используют алюминиевые сплавы АЛ2 и АЛ9; при этом может быть осуществлен прогрессивный метод литья под давлением, значительно сокращающий затраты времени на механическую обработку указанных деталей.

Контрольные вопросы

1. Когда и кем впервые была обнаружена возможность использования электрической энергии для получения механической работы? Как это было осуществлено?
2. Кто и когда предложил трехфазную систему переменного тока и какие электрические машины созданы на этой базе?
3. Назовите основные этапы развития отечественного машиностроения.
4. На каких основных законах электромеханики основана работа электрических машин?
5. Как можно классифицировать электрические машины по роду тока и по назначению?
6. Какие международные стандарты учитываются при проектировании электрических машин?
7. На какие классы нагревостойкости подразделяются электроизоляционные материалы, применяемые в электрических машинах?
8. Какие электротехнические стали применяются для разных магнитопроводов электрических машин?

ГЛАВА 2

ТРАНСФОРМАТОРЫ

2.1. Назначение трансформаторов

Возможность передачи электрических сигналов от одной обмотки к другой посредством взаимной индукции была открыта М. Фарадеем в 1831 г. (см. подразд. 1.1). При изменении тока в одной из обмоток, намотанной на стальной магнитопровод, в другой обмотке индуцировалась ЭДС. Первый работающий трансформатор создали П. Н. Яблочков и И. Ф. Усагин в 1876 г. Это был двухобмоточный трансформатор с разомкнутым магнитопроводом.

Большая роль в развитии электромашиностроения принадлежит М. О. Доливо-Добровольскому. Он разработал основы теории многофазных и, в частности, трехфазных переменных токов и создал первые трехфазные электрические машины и трансформаторы. Трехфазный трансформатор современной формы с параллельными стержнями, расположенными в одной плоскости, был изобретен им в 1891 г. С тех пор трансформатор постоянно совершенствовался: уменьшались его масса и габаритные размеры, повышался КПД. Основные положения теории трансформаторов были разработаны Е. Арнольдом и М. Видмаром.

В развитии теории трансформаторов и совершенствовании их конструкции большое значение имели работы советских и российских ученых (см. подразд. 1.1).

Трансформатором называют статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования первичной системы переменного тока в другую — вторичную, имеющую другие характеристики, в частности другое значение напряжения и тока.

Трансформатор состоит из стального сердечника, служащего для проведения магнитного потока, и двух или (в общем случае) нескольких обмоток, электрически не связанных между собой (в автотрансформаторе они могут быть связаны между собой и электрически).

Трансформатор, имеющий две обмотки, называется *двухобмоточным*; трансформаторы с тремя или несколькими обмотками называются *трех- или многообмоточными*. Наиболее распространенным является двухобмоточный трансформатор.

По роду тока различают одно-, трех- и многофазные трансформаторы.

Под *обмоткой многофазного трансформатора* понимают совокупность фазных обмоток, соединенных между собою определенным образом. Обмотка трансформатора, к которой подводится переменное напряжение, называется *первичной обмоткой*, а от которой энергия отводится — *вторичной*. В соответствии с названиями обмоток все величины, относящиеся к первичной обмотке (мощность, ток, сопротивление и т.д.), тоже называются первичными, а относящиеся ко вторичной обмотке — вторичными.

Обычно обмотка, присоединенная к сети с более высоким напряжением, называется обмоткой *высшего напряжения* (ВН), а та, которая присоединена к сети с меньшим напряжением, — обмоткой *низшего напряжения* (НН).

Трансформатором с ответвлениями называется трансформатор, обмотки которого имеют специальные ответвления для изменения соотношения между числами витков первичной и вторичной обмоток.

Номинальным значением напряжения и тока соответствует одно ответвление.

Наибольшее распространение получили следующие типы трансформаторов:

- силовые — для передачи и распределения электроэнергии;
- автотрансформаторы — для преобразования напряжения в небольших пределах;
- индукционные регуляторы — для регулирования напряжения в распределительных сетях;
- измерительные трансформаторы — для включения в схемы измерительных приборов; трансформаторы специального назначения, например сварочные, печные, испытательные, измерительные, для вентиляльных преобразователей, для преобразователя частоты и т.д.

По теории, конструкции, технологии изготовления и правилам эксплуатации к трансформаторам очень близки реакторы (силовые индуктивные катушки) со сталью. Для передачи электроэнергии на большие расстояния в электропередачах необходимы шунтирующие реакторы для ограничения перенапряжений и компенсации емкостных токов, в сетях с изолированной нейтралью — заземляющие дугогасящие реакторы для уменьшения тока замыкания на землю.

В последние десятилетия получила существенное развитие теория управляемых реакторов, индуктивность которых регулируется подмагничиванием. На основе этой теории созданы серии надежных и относительно недорогих управляемых шунтирующих и дугогасящих реакторов с током, близким к синусоидальному.

2.2. Принцип работы трансформаторов

Однофазный двухобмоточный трансформатор состоит из двух обмоток, размещенных на замкнутом магнитопроводе, который выполнен из ферромагнитного материала (рис. 2.1). Применение ферромагнитного магнитопровода позволяет уменьшить магнитное сопротивление контура, по которому проходит магнитный поток машины. Первичную обмотку 1 подключают к источнику переменного тока с напряжением U_1 . Ко вторичной обмотке 2 присоединяют сопротивление нагрузки Z_n . Начала и концы обмотки ВН обозначают буквами А и Х; обмотки НН — буквами а и х.

При подключении к сети в первичной обмотке возникает переменный ток i_1 , который создает переменный магнитный поток Φ , замыкающийся по магнитопроводу. Поток Φ индуцирует в обеих обмотках переменные ЭДС — e_1 и e_2 , пропорциональные согласно закону Макевелла числу витков w_1 и w_2 соответствующих об-

моток и скорости изменения магнитного потока $\frac{d\Phi}{dt}$. Таким образом, мгновенные значения ЭДС, индуцированные в каждой обмотке, равны

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Отношение мгновенных и действующих ЭДС в обмотках определяется следующим выражением:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (2.1)$$

Если пренебречь падениями напряжения в обмотках трансформатора, которые обычно не превышают 3...5% номинальных зна-

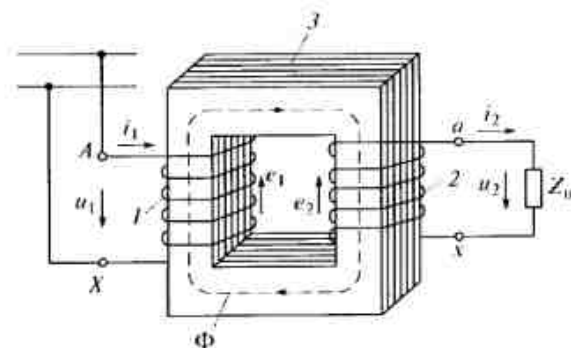


Рис. 2.1. Однофазный двухобмоточный трансформатор:

1 — первичная обмотка; 2 — вторичная обмотка; 3 — магнитопровод

чений напряжения U_1 и U_2 , считать, что $E_1 = U_1$ и $E_2 = U_2$, то получим

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (2.2)$$

В случае когда необходимо повысить вторичное напряжение U_2 , число витков w_2 берут больше w_1 ; такой трансформатор называют повышающим. Когда требуется уменьшить напряжение U_2 то число витков w_2 берут меньше w_1 ; такой трансформатор называют понижающим.

Отношение ЭДС $E_{\text{вн}}$ обмотки высшего напряжения к ЭДС $E_{\text{нн}}$ обмотки низшего напряжения (или отношение их чисел витков) называют коэффициентом трансформации

$$k = \frac{E_{\text{вн}}}{E_{\text{нн}}} = \frac{w_{\text{вн}}}{w_{\text{нн}}}. \quad (2.3)$$

В системах передачи и распределения энергии в ряде случаев применяют трехобмоточные трансформаторы, а в устройствах радиоэлектроники и автоматики — многообмоточные трансформаторы. В таких трансформаторах на магнитопроводе размещают три или большее число изолированных друг от друга обмоток, что позволяет при питании одной из обмоток получать два или большее число различных напряжений (U_2 , U_3 , U_4 и т.д.) для электропитания двух или большего числа групп потребителей. В трехобмоточных силовых трансформаторах различают обмотки высшего, низшего и среднего (СН) напряжений.

В трансформаторе преобразуются только напряжения и токи. Мощность остается приблизительно постоянной (она несколько уменьшается вследствие внутренних потерь энергии в трансформаторе), следовательно,

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{w_2}{w_1}. \quad (2.4)$$

При увеличении вторичного напряжения трансформатора в k раз по сравнению с первичным ток I_2 во вторичной обмотке соответственно уменьшается в k раз.

Трансформатор может работать только в цепях переменного тока. Важным свойством трансформатора, используемым в устройствах автоматики и радиоэлектроники, является его способность преобразовывать нагрузочное сопротивление. Если к источнику переменного тока подключить сопротивление R через трансформатор с коэффициентом трансформации k , то в цепи источника

$$R' = \frac{P_1}{I_1^2} = \frac{P_2}{I_2^2} = \frac{I_2^2 R}{I_1^2} = k^2 R. \quad (2.5)$$

где P_1 — мощность, потребляемая трансформатором от источника переменного тока, Вт; P_2 — мощность, потребляемая сопротивлением R от трансформатора, Вт, $P_2 = I_2^2 R = P_1$.

Таким образом, трансформатор изменяет значение нагрузочного сопротивления R в k^2 раз.

2.3. Конструкции трансформаторов

Сердечники трансформаторов. Сердечником трансформатора называется конструкция, образующая магнитную цепь трансформатора. В зависимости от расположения сердечника относительно обмоток различают (рис. 2.2): трансформаторы стержневые, в которых обмотка охватывает стержни сердечника; трансформаторы броневые, в которых обмотка частично охватывается сердечником; трансформаторы тороидальные.

Часть магнитопровода, на которой размещены обмотки, называют *стержнем*, а на которой обмотки отсутствуют — *ярмом*. Трансформаторы большой и средней мощности обычно выполняют стержневыми. Они имеют лучшее охлаждение и меньшую массу, чем броневые.

Силовые трансформаторы большой мощности броневое типа отечественная промышленность не выпускает, но при значительных мощностях (более 80... 100 МВ·А на фазу) часто применяют бронестержневые трансформаторы, у которых крайние стержни имеют боковые ярма (рис. 2.3). Такая конструкция позволяет уменьшить поперечное сечение верхнего и нижнего ярм по сравнению со стержневыми трансформаторами, в результате чего уменьшается высота трансформатора и упрощается его транспортировка. При дальнейшем повышении мощности для уменьшения высоты верхнего и нижнего ярм применяют трансформаторы многостержневой конструкции. В этом случае мощность

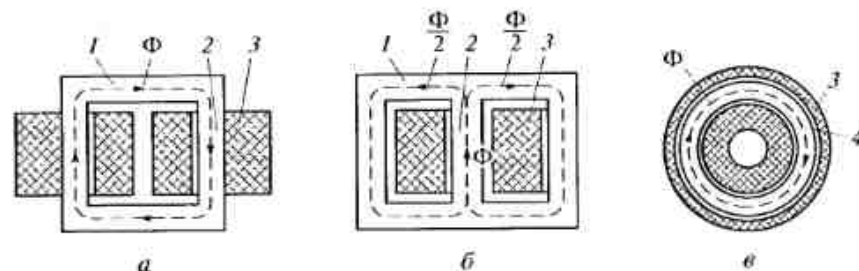


Рис. 2.2. Типы однофазных трансформаторов: а — стержневой; б — броневой; в — тороидальный; 1 — ярмо; 2 — стержень; 3 — обмотка; 4 — тороидальный магнитопровод

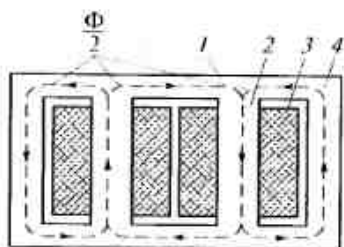


Рис. 2.3. Бронестержневой однофазный трансформатор большой мощности:

1 — верхнее ярмо; 2 — стержни; 3 — обмотки; 4 — боковое ярмо

каждой фазы распределяют между двумя или тремя отдельными стержнями.

Для снижения потерь от вихревых токов магнитопроводы трансформаторов собирают из изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,25...0,5 мм при частоте 50 Гц. Обычно применяют анизотропную холоднокатаную сталь с ребровой структурой (марки 3412...3416), с содержанием кремния 2,8...3,8%. Магнитные свойства этой стали резко улучшаются при совпадении направлений магнитного потока и прокатки:

потери в стали на перемагничивание уменьшаются в 2—3 раза, а магнитная проницаемость и индукция возрастают. Однако использование холоднокатаной стали усложняет конструкцию и технологию изготовления магнитопроводов, так как при этом требуется исключить прохождение магнитного потока поперек направления прокатки или, по крайней мере, уменьшить длину участков, на которых это явление возникает.

Существуют два способа сборки сердечников — впритык и внахлест. По первому способу стержни и ярма собираются отдельно, а затем они прессыются и крепятся специальными стяжными болтами. Между стержнями и ярмом прокладывают изолирующие теплоустойчивые прокладки, с тем чтобы предупредить замыкание вихревых токов, образующихся в стержнях, через ярмо. Этот способ имеет преимущество простоты сборки сердечника и последующей разборки при осмотре трансформатора и его ремонте.

Второй способ требует несколько больше времени, однако он имеет ряд достоинств: зазоры в стыках получаются меньшими, вследствие чего уменьшается ток холостого хода; существует возможность обойтись без шпилек, проходящих через сердечник, либо свести их число к минимуму, вследствие чего конструкция сердечника облегчается; упрощаются приспособления и оборудование для сборки. Благодаря этому второй способ сборки сердечников трансформаторов получил широкое распространение.

В поперечном сечении стержням придают форму вписанного в круг ступенчатого многоугольника или квадрата (рис. 2.4). Квадратная форма сердечника применяется лишь в трансформаторах очень малой мощности, так как при этой форме сердечника плохо используется место внутри круга. Как правило, число ступеней тем больше, чем больше мощность трансформатора и, следовательно, диаметр круга, описанного вокруг стержня.

В трансформаторах большой мощности между отдельными пакетами стали оставляют вентиляционные каналы в направлении, параллельном плоскости листа и перпендикулярном ей (рис. 2.5).

Ярмо стержневого трансформатора имеет в сечении прямоугольную или чаще ступенчатую форму (рис. 2.6). При ступенчатом сечении ярма магнитный поток равномерней распределяется по сечению ярма, так как в этом случае сечения пакетов ярма ближе соответствуют сечениям пакетов стержней. Чтобы уменьшить ток холостого хода и потери в стали трансформатора, сечение ярма делают на 5...15% больше сечения стержня.

В трансформаторах малой мощности магнитопровод собирают из штампованных пластин (рис. 2.7).

Большое распространение получили магнитопроводы, навитые из узкой ленты электротехнической стали (обычно из анизотропной холоднокатаной пермаллой). Их можно использовать для стержневых, броневых, тороидальных и трехфазных трансформаторов. Основными преимуществами таких магнитопроводов

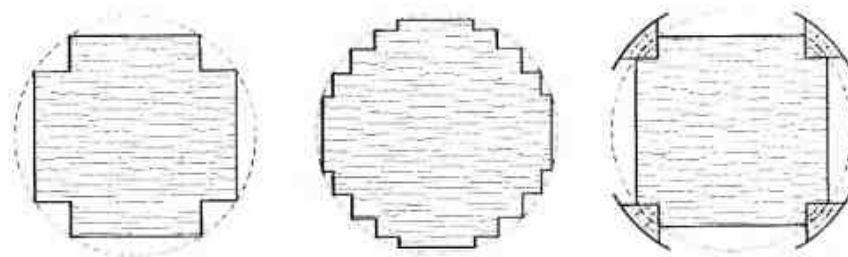


Рис. 2.4. Формы сечений стержней трансформатора

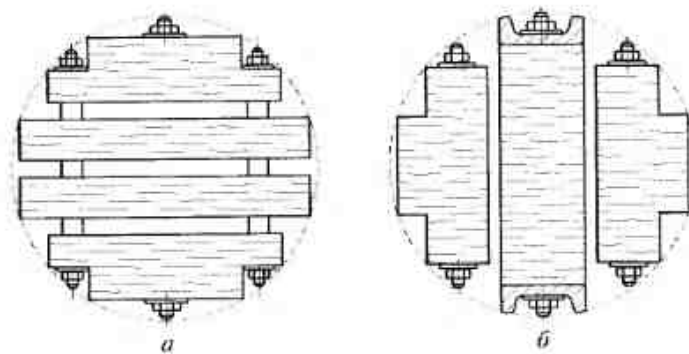


Рис. 2.5. Сечение стержней трансформатора, имеющих продольные (а) и поперечные (б) каналы.

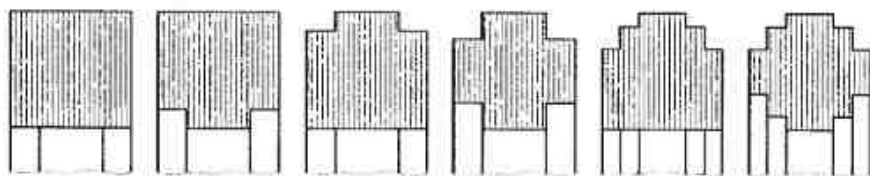


Рис. 2.6. Формы сечений ярма трансформатора

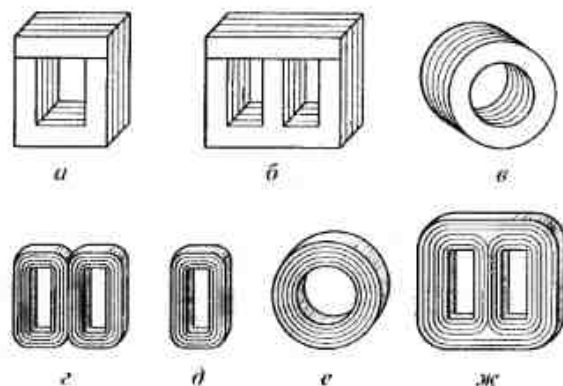


Рис. 2.7. Магнитопроводы трансформаторов малой мощности:
a, d — бронзовой; *б, з* — стержневой; *в, е* — тороидальный; *ж* — трехфазный

перед шихтованными являются лучше использование ферромагнитного материала благодаря ориентации магнитного потока в направлении проката стали или пермаллоя и более высокое сопротивление вихревым токам, что обуславливает снижение потерь мощности в магнитопроводе, особенно при повышенных частотах. Ленточные магнитопроводы бывают неразъемными и разъемными.

Для трансформаторов, работающих на частоте 400 и 500 Гц, магнитопроводы выполняют из специальных сортов электротехнической стали с малыми удельными потерями при повышенной частоте, а также из железоникелевых сплавов типа пермаллой, которые имеют большие начальную и максимальную магнитные проницаемости и позволяют получить магнитные поля с большой индукцией при сравнительно слабой напряженности. Толщина листов стали составляет 0,2; 0,15; 0,1 и 0,08 мм. При частотах более 10... 20 кГц магнитопроводы прессуют из порошковых материалов (магнетодиэлектриков и ферритов).

Обмотки и изоляция. В современных трансформаторах для лучшей магнитной связи первичную и вторичную обмотки стремятся расположить как можно ближе одну к другой. При этом на каждом стержне магнитопровода размещают обе обмотки либо кон-

центрически, либо в виде нескольких дисковых катушек, чередующихся по высоте стержня. В первом случае обмотки называют концентрическими, во втором — чередующимися. В силовых трансформаторах обычно применяют концентрические обмотки, причем ближе к стержням располагают обмотку НН, требующую меньшей изоляции относительно сердечника трансформатора, а снаружи — обмотку ВН (рис. 2.8).

В некоторых случаях для уменьшения индуктивного сопротивления рассеяния обмоток применяют двойные концентрические обмотки (рис. 2.8, *a*), в которых обмотку НН делят на две части с одинаковым числом витков. Аналогично можно выполнить и обмотку ВН. При чередующихся обмотках всю обмотку делят на симметричные группы, состоящие из одной или нескольких катушек ВН и расположенных по обе стороны от них двух или нескольких катушек НН.

Обмотки трансформаторов изготовляют из медных или алюминиевых проводов. При использовании алюминия поперечное сечение провода берется примерно на 70 % больше, чем при использовании меди вследствие большего удельного электрического сопротивления алюминия. В связи с этим габаритные размеры и масса трансформаторов с алюминиевыми обмотками больше, чем у трансформаторов с медными обмотками. При сравнительно небольших мощностях и токах обмотки выполняют из изолированного провода круглого сечения, при больших мощностях и токах применяют провода прямоугольного сечения. В ряде случаев обмотки наматывают из нескольких параллельных проводов.

По конструкции концентрические обмотки бывают цилиндрические непрерывные и винтовые.

Цилиндрические обмотки, выполненные из прямоугольного провода, обычно применяют в качестве обмоток низшего напряжения при мощностях 250 кВ·А на один стержень (до 630 кВ·А для трехфазного трансформатора) и напряжении до 6 кВ. При мощности 10... 16 кВ·А обмотку наматывают в один или два слоя, а при больших мощностях — в два слоя, соединенных последовательно.

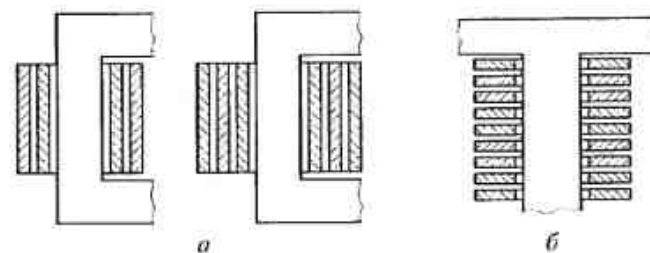


Рис. 2.8. Простая и двойная концентрические (*a*) и чередующиеся (*б*) обмотки трансформатора

Провод наматывают по винтовой линии на бумажно-бакелитовые цилиндры и одновременно изолируют его от стержня магнитопровода и соседних катушек. Если обмотка имеет несколько слоев, то между ними прокладывают изоляционные планки, образующие каналы для прохода масла.

В трансформаторах мощностью 160 до 63 000 кВ·А на стержень и выше при напряжениях 3... 220 кВ в качестве обмоток высшего напряжения часто применяют непрерывные спиральные катушечные обмотки. Обмотку называют непрерывной, потому что ее наматывают без разрывов.

Винтовые одно- и многоходовые обмотки используют обычно в качестве обмоток низшего напряжения в трансформаторах мощностью свыше 250 кВ·А на стержень при напряжении до 15 кВ и токах свыше 300 А — для медных проводов и 150... 200 А — для алюминиевых. Винтовую обмотку наматывают по винтовой линии из нескольких параллельных проводов прямоугольного сечения, прилегающих друг к другу в радиальном направлении. Подобно резьбе винта она может быть одно-, двух- и иногда многоходовой. Между отдельными витками располагают охлаждающие каналы.

При использовании винтовых и непрерывных катушечных обмоток, выполненных из нескольких параллельных проводников, необходимо предусмотреть, чтобы ток между ними распределялся равномерно, так как более удаленные от оси катушки провода имеют несколько большую длину. Кроме того, витки, образуемые этими проводами, сцеплены с различными по величине магнитными потоками и в них индуцируются разные ЭДС. Чтобы уравнять длины параллельных проводов и создать одинаковые условия для индуцирования в них ЭДС, осуществляют транспозицию проводов, т.е. провода периодически по длине обмотки меняют местами так, чтобы каждый провод занимал все возможные положения относительно оси катушки.

В настоящее время широкое применение получили винтовые обмотки из транспонированного провода, в котором при изготовлении отдельные проводники с лаковой изоляцией меняются местами. Поверх провода накладывают общую изоляцию из кабельной бумаги. Используют также подразделенные провода, состоящие из двух-трех изолированных проводников, охватываемых общей изоляцией. Такое разделение проводника приводит к значительному (на 20... 30 %) снижению добавочных потерь от индуцируемых в проводниках вихревых токов.

В трансформаторах малой мощности и микротрансформаторах используют однослойные и многослойные обмотки из круглого провода с эмалевой или хлопчатобумажной изоляцией, которые наматывают на гильзу или на каркас из электрокартона. Между слоями проводов прокладывают изоляцию из кабель-

ной бумаги или ткани. В микротрансформаторах обмотки часто выполняют из алюминиевой фольги толщиной 30... 20 мкм. Изоляцией здесь служит окисная пленка фольги, которая обладает достаточной теплоемкостью, теплопроводностью и может выдерживать рабочее напряжение до 100 В. В высокочастотных трансформаторах применяют расщепленные многожильные провода. В трансформаторах, работающих в условиях высокой температуры и радиоактивного облучения, нашли применение провода из анодированного алюминия и с изоляцией из кварцевых нитей. В этих трансформаторах применяют галетные обмотки. Такая обмотка состоит из отдельных унифицированных элементов — галет, каждая из которых представляет собой законченный конструктивный элемент. Галеты собирают на стержне магнитопровода и соединяют между собой в соответствии с электрической схемой трансформатора. Путем последовательного и параллельного соединения унифицированных галет можно получать различные значения токов и напряжений трансформатора. Галеты изготовляют из обмоточного провода и алюминиевой фольги. В тороидальных трансформаторах обмотки располагают по всей окружности магнитопровода, причем на внутренней поверхности укладывают большее число слоев, чем на внешней. Изоляцию обмоток от магнитопровода осуществляют путем обматывания последнего лентой из изоляционного материала.

Изоляцию обмоток трансформаторов подразделяют на главную — от магнитопровода и между обмотками (НН и ВН), и продольную — изоляцию между витками, слоями и катушками каждой обмотки. Существует также изоляция отводов от обмоток, переключателей и выводов. Изоляция обмоток трансформатора от заземленных частей и друг от друга определяется электрической прочностью при частоте 50 Гц. Прочность изоляции обеспечивается соответствующим выбором величины изоляционных промежутков, которые в масляных трансформаторах одновременно выполняют роль охлаждающих каналов.

В высоковольтных трансформаторах, чтобы предотвратить пробой изоляции при воздействии на обмотку импульсных перенапряжений, между обмотками дополнительно ставят жесткие бумажно-бакелитовые цилиндры или мягкие цилиндры из электроизоляционного картона. При этом (во избежание электрического разряда по поверхности изоляционных цилиндров) они должны иметь по высоте большие размеры, чем обмотки. Между обмотками ВН различных фаз устанавливают межфазную изоляционную перегородку. Соблюдение изоляционного расстояния обмоток от яра обеспечивают шайбами и прокладками из электроизоляционного картона. Между концевой изоляцией обмотки и ярмовыми балками магнитопровода в некоторых трансформа-

торах устанавливают металлические разрезные или неметаллические прессующие кольца.

В трансформаторах напряжением 35 кВ для защиты от атмосферных перенапряжений две начальные и две конечные катушки обмотки ВН выполняют с усиленной изоляцией. Однако такая изоляция ухудшает условия охлаждения начальных и конечных катушек, поэтому их выполняют из провода большего поперечного сечения.

В трансформаторах напряжением 110 кВ и выше для уменьшения напряжения на концевых катушках обмотки ВН и выравнивания электрического поля у концов обмотки применяют емкостную компенсацию в виде емкостных витков и емкостных колец (рис. 2.9).

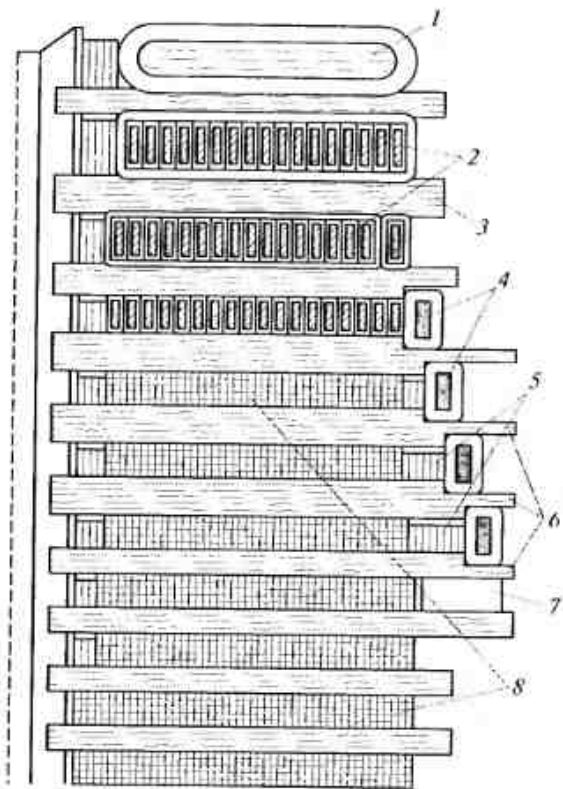


Рис. 2.9. Емкостные кольца и экранирующие витки на обмотке трансформатора:

1 — емкостное кольцо; 2 — лисковые входные катушки с дополнительной изоляцией; 3 — изоляционные прокладки; 4 — экранирующие витки; 5 — изоляционные подосы; 6 — выступы удлиненных прокладок; 7 — опорный удлиненный сегмент; 8 — непрерывная обмотка

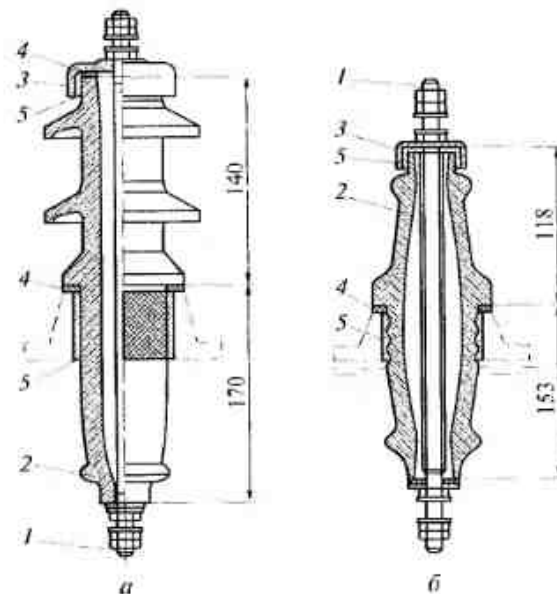


Рис. 2.10. Проходной изолятор на 6 кВ с воздушным заполнением:

a — для наружных установок; *б* — для внутренних установок; 1 — токоведущий стержень; 2 — изолятор; 3 — металлический колпак; 4 — цементующая замазка; 5 — уплотняющая прокладка из маслоупорной резины

Изоляция между катушками, слоями и витками обеспечивает как электрическую прочность обмотки при частоте 50 Гц, так и прочность при воздействии импульсных перенапряжений. Обычно межкатушечную изоляцию осуществляют радиальными масляными каналами, простыми и угловыми шайбами из электроизоляционного картона. В качестве межслойной изоляции, как правило, применяют несколько слоев кабельной бумаги, электроизоляционный картон или лакоткань. Изоляция между витками достигается изоляцией обмоточного провода.

Проходные изоляторы служат для присоединения обмоток трансформатора к линии и устанавливаются на крышке или стенке бака. Различают следующие типы проходных изоляторов: сплошные фарфоровые, фарфоровые с воздушным или масляным заполнением, фарфоровые маслonaполненные с комбинированной внутренней изоляцией, конденсаторные.

На рис. 2.10 и 2.11 показаны проходные изоляторы на 6 кВ с воздушным заполнением и на 35 кВ с масляным заполнением для наружных и внутренних установок. Части изоляторов, работающие в воздухе, для удлинения пути поверхностного разряда снабжаются ребрами. Изоляторы для внутренних установок ребер не имеют.

На рис. 2.12 изображен проходной изолятор на 110...220 кВ с масляным заполнением. Токоведущий кабель проходит внутри медной изолированной трубки, окруженной рядом ступенчатых изолирующих цилиндров. В верхней части изолятора имеется стеклянный резервуар, служащий расширителем для заполняющего изолятор масла. Размеры изоляторов данного типа весьма велики и в высоту иногда достигают 5 м.

Изоляторы конденсаторного типа представляют собой ряд концентрических цилиндров из изолирующего материала, уменьшающихся по высоте по мере удаления от оси изолятора и проложенных тонкими металлическими прокладками. Таким образом, изолятор представляет собой ряд конденсаторов, последовательно соединенных между собой. Конденсаторные изоляторы могут быть выполнены на самые высокие напряжения. Их преимущество состоит в малой массе и габаритных размерах, но применяются они сравнительно редко, поскольку стоят дороже обычных.

В силовых трансформаторах для отвода теплоты от обмоток и магнитопровода применяют следующие способы охлаждения: воз-

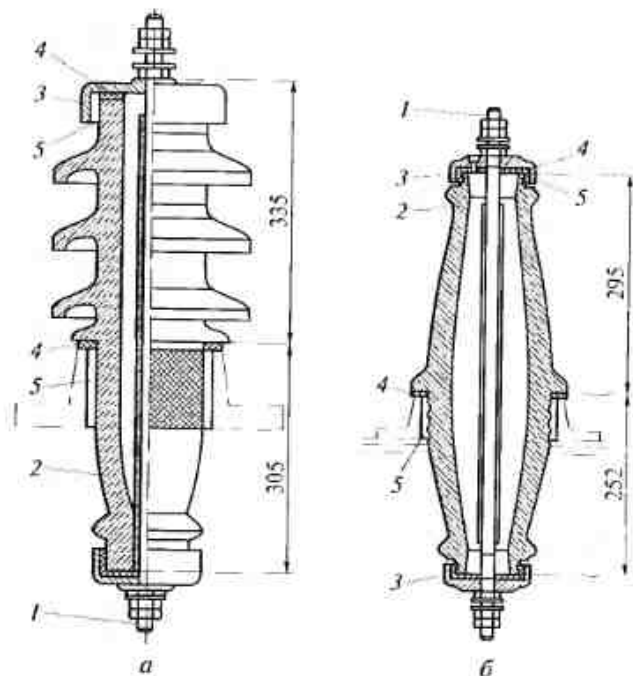
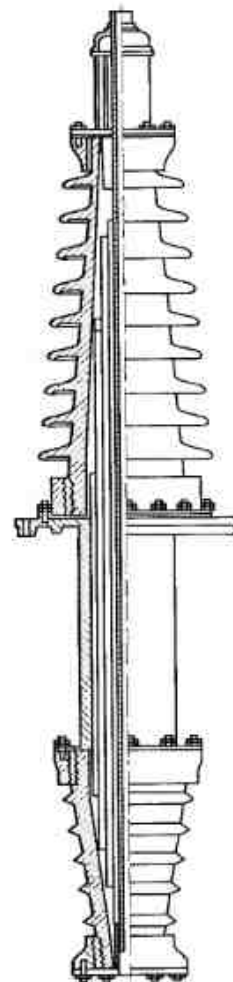


Рис. 2.11. Проходной изолятор на 35 кВ с масляным заполнением:

a — для наружных установок; *б* — для внутренних установок; 1 — токоведущий стержень; 2 — изолятор; 3 — металлический колпак; 4 — цементирующая замазка; 5 — уплотняющая прокладка из маслоупорной резины

Рис. 2.12. Проходной изолятор на 110...220 кВ с масляным заполнением



душное, масляное и посредством негорючего жидкого диэлектрика. Каждый вид охлаждения имеет соответствующее условное обозначение.

Трансформаторы с воздушным охлаждением (сухие трансформаторы). При естественном воздушном охлаждении магнитопровод, обмотки и другие части трансформатора имеют непосредственное соприкосновение с окружающим воздухом, поэтому их охлаждение происходит путем конвекции воздуха и излучения.

Сухие трансформаторы устанавливают внутри помещений (в зданиях, производственных цехах и пр.), при этом главным требованием является обеспечение пожарной безопасности. В эксплуатации они удобнее масляных, так как исключают необходимость периодической очистки и смены масла. Следует, однако, отметить, что воздух обладает меньшей электрической прочностью, чем трансформаторное масло, поэтому в сухих трансформаторах все изоляционные промежутки и вентиляционные каналы делают больше, чем в масляных.

Вследствие меньшей теплопроводности воздуха по сравнению с маслом электромагнитные нагрузки активных материалов в сухих трансформаторах меньше, чем в масляных, что приводит к увеличению сечения проводов обмотки и магнитопровода. Поэтому масса активных частей сухих трансформаторов больше, чем масляных. В настоящее время изготавливают сухие трансформаторы мощностью до 10 МВ·А и напряжением обмотки ВН до 35 кВ. Их устанавливают только в сухих закрытых помещениях с относительной влажностью воздуха до 80 % во избежание чрезмерного увлажнения обмоток.

Сухие трансформаторы с естественным воздушным охлаждением могут иметь открытое (С), защищенное (СЗ) или герметизированное (СГ) исполнение. Трансформаторы типа СЗ закрывают защитным кожухом с отверстиями, а типа СГ — герметическим кожухом. Для повышения интенсивности охлаждения применяют обдув обмоток и магнитопровода потоком воздуха от вен-

тилятора. Сухие трансформаторы с воздушным дутьем имеют условное обозначение СД.

Трансформаторы малой мощности выполняют, как правило, с охлаждением типа С. В некоторых случаях их помещают в корпус, залитый термореактивными компаундами на основе эпоксидных смол или других подобных материалов. Такие компаунды обладают высокими электроизоляционными и влагозащитными свойствами. После затвердевания они не расплавляются при повышенных температурах и обеспечивают надежную защиту трансформатора от механических и атмосферных воздействий.

Трансформаторы с масляным охлаждением. В трансформаторах с естественным масляным охлаждением (М) магнитопровод с обмотками погружают в бак, наполненный тщательно очищенным минеральным (трансформаторным) маслом. Это масло обладает более высокой теплопроводностью, чем воздух, и хорошо отводит тепло от обмоток и магнитопровода трансформатора к стенкам бака, имеющего большую площадь охлаждения, чем трансформатор. Погружение трансформатора в бак со специальным маслом обеспечивает также повышение электрической прочности изоляции его обмоток и предотвращает ее увлажнение и потерю изоляционных свойств под влиянием атмосферных воздействий.

В трансформаторах мощностью 20...30 кВ А выделяется сравнительно небольшое количество тепла, поэтому их баки имеют гладкие стенки; у более мощных трансформаторов (20...1800 кВ А) поверхность охлаждения бака искусственно увеличивают, применяя ребристые или волнистые стенки (рис. 2.13 и 2.14), либо ок-

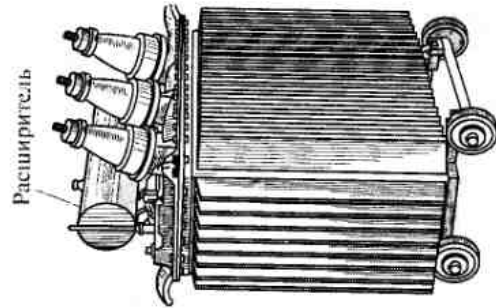


Рис. 2.13. Трансформатор с волновым баком

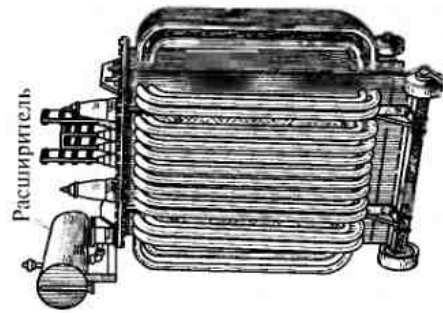


Рис. 2.14. Трансформатор с трубчатым баком

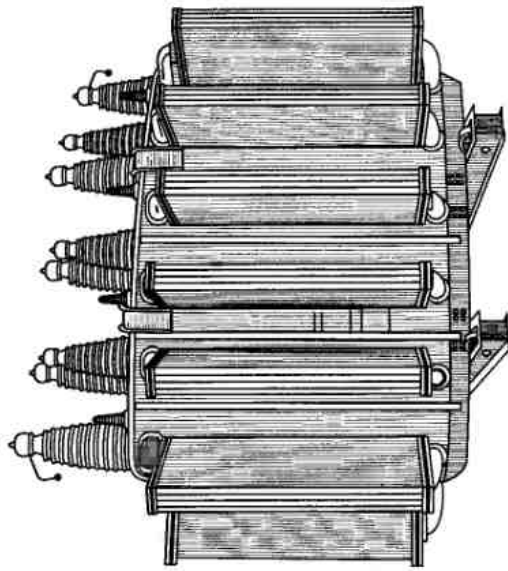


Рис. 2.15. Трансформатор с радиаторами

ружая бак системой труб, в которых масло циркулирует за счет конвекции. Для повышения интенсивности охлаждения в трансформаторах мощностью более 1800 кВ А к баку пристраивают навесные или отдельно установленные трубчатые теплообменники (радиаторы), которые с помощью патрубков с фланцами соединяются с внутренней полостью бака (рис. 2.15). В радиаторе происходит усиленная циркуляция масла и интенсивное охлаждение. Масляные трансформаторы типа М применяют для мощностей до 10 000 кВ А.

Трансформаторы мощностью 10 000...63 000 кВ А выполняют обычно с обдувом (тип Д). В этом случае теплоотдача с поверхности радиаторов форсируется путем обдува их вентиляторами (рис. 2.16), при этом теплоотдача увеличивается в 1,5—1,6 раза. В трансформаторах с охлаждением типа ДЦ масло откачивается из бака насосом и прогоняется через навесные или отдельно установленные теплообменники (охладители), обдуваемые воздухом. Охлаждение с принудительной циркуляцией масла применяют в трансформаторах мощностью 16 000...250 000 кВ А и выше. При использовании масляно-водного охлаждения нагретое масло проходит через теплообменники, охлаждаемые водой. Циркуляция масла осуществляется за счет естественной конвекции (при охлаждении типа МВ) или же с помощью насоса (при охлаждении типа Ц).

Трансформаторы, охлаждаемые негорючим жидким диэлектриком. Трансформаторы с охлаждением типов Н и НД выполняют с герметизированным баком, который заполняют негорючим жид-

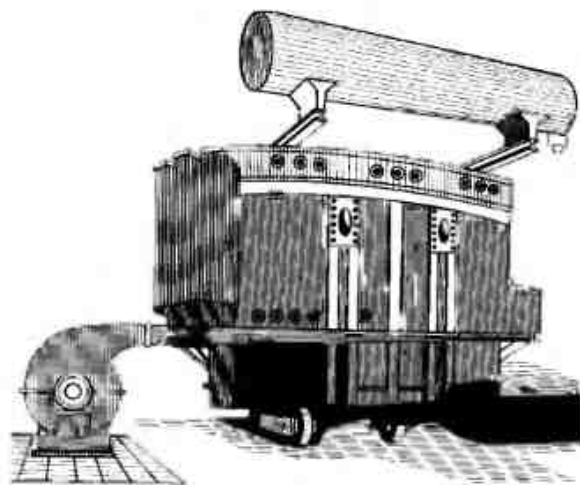


Рис. 2.16. Трансформатор с обдувом

ким диэлектриком. Обычно применяют синтетические изоляционные материалы, которые имеют примерно такие же электроизоляционные свойства и теплопроводность, как и трансформаторное масло. Трансформаторы с охлаждением типов Н и НД пожаробезопасны и могут устанавливаться в закрытых помещениях. Их выпускают мощностью 160...2500 кВ·А при напряжении 6 и 10 кВ.

Во время работы масло в трансформаторе нагревается и расширяется. При уменьшении нагрузки оно, охлаждаясь, возвращается к первоначальному объему. Поэтому масляные трансформаторы мощностью 25 кВ·А и выше имеют небольшой дополнительный бак-расширитель, соединенный с внутренней полостью основного бака (рис. 2.17). При нагревании трансформатора объем масла, находящегося в баке-расширителе, увеличивается. Объем масла в баке-расширителе составляет около 10 % всего объема масла в баке. Применение бака-расширителя позволяет значительно сократить поверхность соприкосновения масла с воздухом, что уменьшает его загрязнение и увлажнение. Баки-расширители имеют воздухоосушитель, заполненный сорбентом — веществом, поглощающим влагу из воздуха, поступающего в бак-расширитель. При мощности 160 кВ·А и выше на них устанавливают также *термосифонный фильтр* для непрерывного обезвоживания и очистки масла. Для более надежного предохранения масла от окисления трансформаторы большой мощности выполняют герметизированными с полной изоляцией масла, находящегося в баке-расширителе, от атмосферного воздуха. Это осуществляется с помощью инертного газа (азота), расположенного между поверхностью масла и

гибкой растягивающейся мембраной — *азотная защита*. Масляные трансформаторы во избежание опасности пожара и взрыва устанавливают на открытых ограждаемых площадках или в специально сооруженных помещениях с огнестойкими стенами, опорами и перекрытиями. Для заливки, отбора пробы, спуска и фильтрации масла их оснащают соответствующей арматурой (кранами, вентилями, пробками).

Все трансформаторы имеют различные устройства для подъема и перемещения: рым-болты, крюки, переставные катки и поворотные тележки.

Для контроля уровня и температуры масла масляные трансформаторы оснащают указателями уровня и температуры. Указатель уровня обычно устанавливают на расширителе, а указатель температуры — на крышке основного бака. В трансформаторах мощностью до 1000 кВ·А для этой цели используют ртутный термометр, а в трансформаторах большей мощности и в герметизированных трансформаторах — специальный электрический термосигнализатор. Трансформаторы с охлаждением типов Д, ДЦ и НД имеют два термосигнализатора, один из которых служит для измерения температуры верхних слоев масла, а другой — для автоматического управления процессом дутья.

Система автоматического управления должна обеспечивать: автоматическое включение и отключение системы охлаждения одновременно с включением в сеть и отключением трансформатора, регулирование интенсивности охлаждения в зависимости от нагрузки, включение резервного охладителя при отказе основного, ввод резервного источника питания при снижении или отключении питания электродвигателей вентиляторов и насосов системы охлаждения и подачу соответствующей сигнализации о прекращении работы системы охлаждения. Трансформаторы мощно-

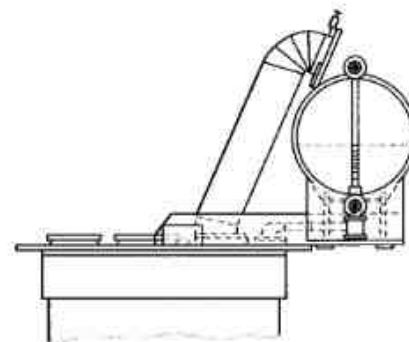


Рис. 2.17. Маслорасширитель с термосифонной трубой

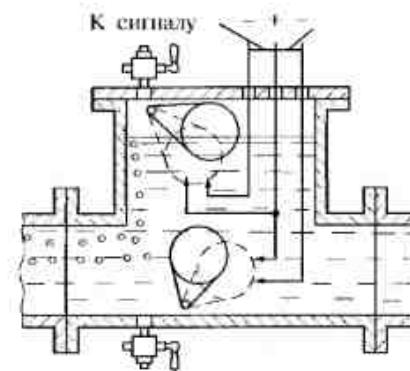


Рис. 2.18. Газовое реле

стью 10 000 кВ·А и выше оборудуются также реле низкого уровня масла, находящегося в расширителе, которое сигнализирует о снижении уровня масла и автоматически отключает трансформатор при недопустимом его уменьшении.

Для защиты от возможных аварий трансформаторы мощностью более 1 000 кВ·А имеют специальные газовые реле, которые устанавливаются в трубопроводе между основным баком и расширителем (рис. 2.18). При значительном выделении взрывоопасных газов, возникающих в результате разложения масла, реле автоматически выключает трансформатор, предупреждая развитие аварии. В этих трансформаторах устанавливают *выхлопную трубу*, закрытую стеклянной мембраной. При внезапном повышении внутреннего давления образовавшиеся газы выдавливают мембрану и выходят в атмосферу, предотвращая деформацию бака.

Чтобы предотвратить появления высокого потенциала на обмотке НН при повреждении изоляции обмотки ВН, в трансформаторах, у которых обмотка НН имеет напряжение до 0,69 кВ, между этой обмоткой и заземленным баком включают пробивной предохранитель, пробиваемый при напряжении 1 000 В.

2.4. Работа однофазного трансформатора в режиме холостого хода

Условимся обозначать переменные во времени напряжения, ЭДС и токи их действующими значениями, а потоки — максимальными.

Подведем к зажимам $A-X$ первичной обмотки трансформатора номинальное напряжение U_1 при номинальной частоте и синусоидальной форме его кривой. Зажимы $a-x$ вторичной обмотки разомкнуты, и, следовательно, вторичный ток равен нулю. Под воздействием напряжения U_1 по первичной обмотке потечет ток холостого хода I_0 , который создает МДС $F_0 = I_0 w_1$, где w_1 — число последовательно соединенных витков первичной обмотки. МДС F_0 создает магнитный поток, упрощенная картина которого для концентрической обмотки стержневого трансформатора показана на рис. 2.19. Преобладающая часть линий потока замыкается по сердечнику и, будучи сцеплена с обеими обмотками, образует основной магнитный поток Φ_m . Другая часть потока, обычно гораздо меньшая, проходит в основном по немагнитной среде и, будучи сцеплена только первичной обмоткой, образует поток рассеяния первичной обмотки Φ_{s1} при холостом ходе.

Основной магнитный поток Φ_m создает в первичной и вторичной обмотках основные ЭДС E_1 и E_2 , а поток рассеяния Φ_{s1} создает только в первичной обмотке ЭДС рассеяния E_{s1} . Кроме того, первичная обмотка обладает еще активным сопротивлением R_1 . При протекании

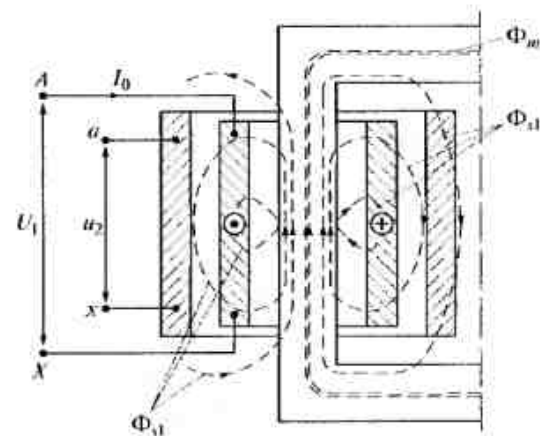


Рис. 2.19. Магнитные потоки однофазного трансформатора при холостом ходе

нии тока по обмотке в ней возникает сила противодействия, которую условимся называть ЭДС активного сопротивления E_{R1} .

При установлении количественных зависимостей между различными величинами при холостом ходе будем исходить из закона равновесия ЭДС, согласно которому напряжение, подведенное к первичной обмотке трансформатора, должно быть в любой момент времени уравновешено совокупностью ЭДС, возникающих в этой обмотке, т.е. подведенное напряжение должно быть в любой момент равно по величине сумме ЭДС, но направлено относительно последней в противоположную сторону. Поскольку мы условились оперировать с действующими значениями ЭДС, то под совокупностью противодействующих ЭДС должны понимать их геометрическую сумму. Таким образом.

$$\dot{U}_1 = -(\dot{E}_1 + \dot{E}_{s1} + \dot{E}_{R1}). \quad (2.6)$$

При холостом ходе трансформатора отдаваемая им полезная мощность равна нулю. Тем не менее трансформатор потребляет из сети некоторую мощность, которая тратится на покрытие потерь холостого хода, главным образом потерь в стали.

Трансформатор без активного сопротивления, рассеяния и потерь в стали, будем называть *упрощенным*. Нетрудно установить зависимость между главными величинами, определяющими работу трансформатора. В данном случае уравнение равновесия ЭДС имеет вид

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1, \quad (2.7)$$

откуда следует, что в упрощенном трансформаторе кривая E_1 является зеркальным изображением кривой напряжения U_1 относи-

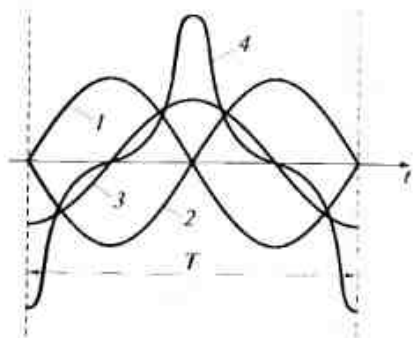


Рис. 2.20. ЭДС и токи упрощенного однофазного трансформатора:
1 — ЭДС; 2 — напряжение; 3, 4 — токи

тельно оси абсцисс. На рис. 2.20 напряжение U_1 и ЭДС E_1 изображены в виде синусоид 1 и 2, сдвинутых друг относительно друга на 180° . На рис. 2.21 напряжение \dot{U}_1 и ЭДС \dot{E}_1 показаны двумя векторами OA и OF ; $OA = -OF$.

Теперь можно установить зависимость между ЭДС E_1 и основным потоком Φ_m . Если w_1 — число последовательно соединенных витков первичной обмотки, то по закону электромагнитной индукции

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.8)$$

где e_1 и Φ — мгновенные значения первичной ЭДС и основного потока. Если ЭДС представляет собой синусоиду, то создающий ее поток является косинусоидальной функцией времени, т.е.

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t, \quad (2.9)$$

где ω — угловая частота, $\omega = 2\pi f$.

Знак «-» в формуле (2.8), показывает, что первичная ЭДС отстает от основного потока по фазе или основной поток опережает первичную ЭДС по фазе на угол, определяемый производной, т.е. в данном случае на 90° . На рис. 2.20 изображена косинусоида 3 основного потока, а вектор $OT = \Phi_m$ этого потока приведен на рис. 2.21.

Подставив в (2.8) значение потока Φ , найдем

$$e_1 = -w_1 \frac{d(\Phi_m \cos \omega t)}{dt} = \omega w_1 \Phi_m \sin \omega t. \quad (2.10)$$

Наибольшее значение первичная ЭДС имеет при $\sin \omega t = 1$, тогда

$$E_{m1} = \omega w_1 \Phi_m = 2\pi f w_1 \Phi_m. \quad (2.11)$$

Следовательно, действующее значение первичной ЭДС будет равно

$$E_1 = \frac{E_{m1}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_1 \Phi_m = 4,44 f w_1 \Phi_m. \quad (2.12)$$

Аналогично ЭДС вторичной обмотки

$$E_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_2 \Phi_m = 4,44 f w_2 \Phi_m. \quad (2.13)$$

По фазе ЭДС \dot{E}_2 , так же как и ЭДС \dot{E}_1 , отстает от потока Φ_m на 90° . На рис. 2.21 она показана вектором $OD = \dot{E}_2$.

Говоря о холостом ходе упрощенного трансформатора, необходимо определить также ток холостого хода, который в данных условиях играет роль только намагничивающего тока и поэтому называется намагничивающим. Амплитуда этого тока и форма кривой зависят от степени насыщения стали. Сталь можно считать ненасыщенной, пока сохраняется пропорциональность между значениями индукции в стали и намагничивающим током. Следовательно, при синусоидальном потоке ток холостого хода в общем случае несинусоидален, а искажение формы кривой тока тем больше, чем сильнее насыщена сталь.

Поскольку кривая намагничивающего тока симметрична относительно оси абсцисс, то гармонический ряд содержит только гармонические нечетного порядка — первую, третью, пятую и т.д. Первая гармоническая тока находится в фазе с основным потоком и, следовательно, отстает от первичного напряжения на 90° . Амплитуда первой гармонической тока меньше амплитуды действительной кривой тока, причем эта разница тем больше, чем сильнее насыщена сталь.

Из высших гармонических тока сильнее всего выражена третья. На нее следует обратить особое внимание, так как она оказывает значительное влияние на работу трехфазных трансформаторов при некоторых способах соединения их обмоток.

Поскольку ток I_0 несинусоидален, то на векторной диаграмме (см. рис. 2.21) можно показать вектор $OH = I_{01}$ только первой гармонической тока холостого хода. Высшие гармонические тока I_0 на диаграмме не изображаются и, следовательно, диаграмма в отношении тока I_0 является приближенной. В связи с тем что ток I_0 отстает от напряжения \dot{U}_1 на 90° , то мощность холостого хода упрощенного трансформатора равна нулю, поскольку в упрощенном трансформаторе нет потерь.

Рассмотрим режим холостого хода реального однофазного трансформатора. При построении диаграммы проще всего исхо-

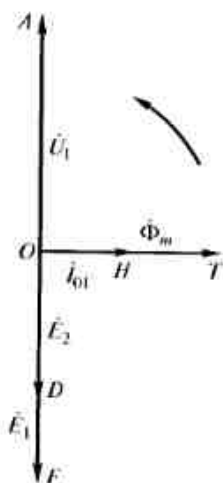


Рис. 2.21. Векторная диаграмма упрощенного трансформатора

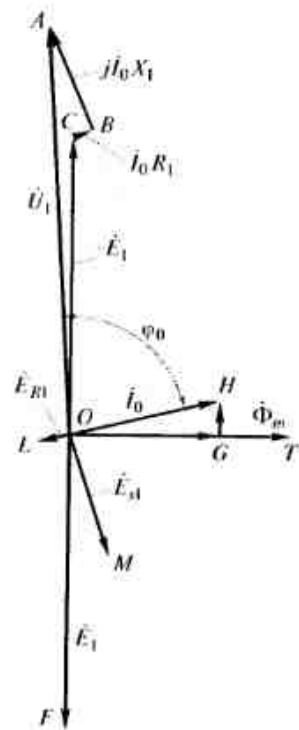


Рис. 2.22. Векторная диаграмма холостого хода реального трансформатора

лдить из основного потока Φ_m , вектор которого OT совместим с положительным направлением оси абсцисс (рис. 2.22). Тогда $\dot{E}_1 = OF$. Вектор тока холостого хода $\dot{I}_0H = \dot{I}_0$ строится по двум составляющим: реактивной $\dot{I}_{0r} = OG$, находящейся в фазе с потоком Φ_m , и активной $\dot{I}_{0a} = GH$, расположенной перпендикулярно первой составляющей. По величине

$$I_{0a} = \frac{P_0}{U_1},$$

где P_0 — мощность холостого хода.

Обычно ток $I_{0a} \leq 10\%$ тока I_{0r} , поэтому он оказывает ничтожное влияние на величину тока холостого хода, однако он сильно влияет на форму и фазу тока холостого хода. Рассмотрим потери на гистерезис, так как в трансформаторной стали

они имеют наибольшее значение в ряду потерь холостого хода (приблизительно 85% суммы потерь).

Разложив кривую тока холостого хода I_0 , построенную с учетом действия петли гистерезиса, в гармонический ряд, можно убедиться, что поток Φ отстает от первой гармонической тока \dot{I}_{01} на угол α , который называют углом магнитного запаздывания.

Зная \dot{I}_0 , можно построить векторы ЭДС активного сопротивления $\dot{E}_{R1} = OL$ и ЭДС рассеяния $\dot{E}_{\sigma 1} = OM$ (см. рис. 2.22).

ЭДС \dot{E}_{R1} находится в противофазе с током \dot{I}_0 , следовательно

$$\dot{E}_{R1} = -\dot{I}_0 R_1, \quad (2.14)$$

где R_1 — активное сопротивление первичной обмотки.

ЭДС $\dot{E}_{\sigma 1}$ создается первичным потоком рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и отстает от него на 90° . Поскольку поток $\Phi_{\sigma 1}$ практически не испытывает влияния гистерезиса и вихревых токов, то он совпадает по фазе с током \dot{I}_0 . Следовательно,

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_0 X_1, \quad (2.15)$$

где X_1 — индуктивное сопротивление первичной обмотки, соответствующее потоку $\Phi_{\sigma 1}$.

Чтобы получить вектор $OA = \dot{U}_1$, можно геометрически сложить три составляющих напряжения:

$$OC = -\dot{E}_{\sigma 1}; \quad CB = -\dot{E}_{R1} = \dot{I}_0 R_1; \quad BA = -\dot{E}_{\sigma 1} = j\dot{I}_0 X_1,$$

каждая из которых равна соответствующей ЭДС по величине, но обратна ей по направлению. Таким образом,

$$\dot{U}_1 = -(\dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{E}_{R1}), \quad (2.16)$$

или

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_0 X_1 + \dot{I}_0 R_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1, \quad (2.17)$$

где Z_1 — полное сопротивление первичной обмотки, $Z_1 = R_1 + jX_1$. Составляющие напряжения $\dot{I}_0 R_1$ и $j\dot{I}_0 X_1$ называют активным и индуктивным падением напряжения в первичной обмотке трансформатора.

На рис. 2.22 векторы CB и BA изображены в увеличенном масштабе. В действительности падения напряжения при холостом ходе настолько малы, что ими всегда пренебрегают.

При холостом ходе в трансформаторе имеются следующие потери: в меди первичной обмотки P_{a1} , основные потери в стали сердечника P_{c0} и добавочные потери холостого хода $P_{доб}$.

Мощность P_0 , потребляемая трансформатором при холостом ходе, тратится целиком на покрытие потерь холостого хода, т.е.

$$P_0 = P_{a1} + P_{c0} + P_{доб}. \quad (2.18)$$

Расчеты показывают, что потерями $P_{a1} = I_0^2 R_1$ можно пренебречь, так как они обычно меньше 2% потерь холостого хода. Поэтому можно принять

$$P_0 = P_{c0} + P_{доб} = P_c, \quad (2.19)$$

т.е. мощность холостого хода тратится только на потери в стали.

Основные потери в стали сердечника состоят из потерь на гистерезис и на вихревые токи. Сердечники трансформаторов собираются из специальной высоколегированной или так называемой трансформаторной стали толщиной 0,5 и 0,35 мм. Трансформаторная сталь имеет значительную добавку кремния, от которой меняются все свойства стали (механические, магнитные и электрические характеристики).

В механическом отношении трансформаторная сталь отличается хрупкостью и труднее поддается обработке, чем динамная сталь. В магнитном отношении она имеет большую магнитную проницаемость, чем динамная сталь, при индукциях меньше 1,0 Тл и меньшую магнитную проницаемость при более высоких индукциях. В электрическом отношении присадка кремния сильно увели-

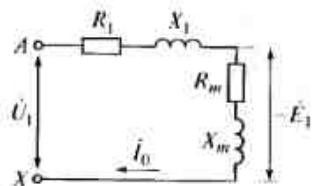


Рис. 2.23. Схема замещения трансформатора при холостом ходе

шпилек), влиянием магнитного потока на некоторые металлические части (например, шпильки, бак — при соединении обмоток Y/Y), потерями в изоляции трансформаторов высокого напряжения. Добавочные потери составляют 10... 15% основных потерь.

Из уравнения (2.17) следует, что при холостом ходе трансформатор можно представить как последовательное соединение двух катушек, из которых одна не имеет сердечника и определяется сопротивлениями $Z_1 = R_1 + jX_1$ первичной обмотки трансформатора, а другая имеет сердечник и определяется сопротивлениями $Z_m = R_m + jX_m$ (рис. 2.23). Такая цепь называется схемой замещения трансформатора при холостом ходе. На схеме видно, что

$$Z_m = -\frac{E_1}{I_0}; \quad (2.20)$$

$$R_m = \frac{P_0}{I_0^2} \quad (2.21)$$

и

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}. \quad (2.22)$$

Сопротивления Z_m , R_m и X_m называются параметрами намагничивающего контура.

Параметры холостого хода определяются из опыта холостого хода. К зажимам одной из обмоток трансформатора — обычно обмотке НН — подводят номинальное, практически синусоидальное по форме напряжение при номинальной частоте. Измерив напряжение U_1 , ток I_0 и мощность P_0 , можно определить

$$Z_0 = \frac{U_1}{I_0}; \quad R_0 = \frac{P_0}{I_0^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}. \quad (2.23)$$

Поскольку сопротивления R_m и X_m по сравнению с сопротивлениями R_1 и X_1 обычно весьма малы, то ими можно пренебречь и определить параметры намагничивающего контура по формулам (2.23).

чивает электрическое сопротивление стали и этим сильно уменьшает потери на вихревые токи, относительно мало влияя на потери на гистерезис.

Кроме основных потерь $P_{св}$, при холостом ходе трансформатора всегда имеют место добавочные потери, обусловленные изменением структуры стали при механической обработке листов, неравномерным распределением магнитной индукции (например, в местах стыков и расположения

2.5. Трехфазный трансформатор. Классификация магнитных систем

Различают два основных вида магнитных систем трансформаторов — независимые и связанные.

Примером трехфазного трансформатора с независимой магнитной системой служит трехфазная трансформаторная группа, или, иначе, групповой трансформатор, представляющий собой три одинаковых однофазных трансформатора, обмотки которых определенным образом соединены между собой.

Трансформатор со *связанной магнитной системой* показан на рис. 2.24. Это один из самых распространенных типов трехфазных трансформаторов, так называемый *трехстержневой трансформатор*. Менее распространены *пятистержневые* трехфазные трансформаторы, состоящие из трех основных стержней, несущих обмотки, и двух добавочных стержней по бокам (не несущих обмотки), служащих для уменьшения размеров ярем.

Магнитная система трехстержневого трансформатора несимметрична. Действительно, длины магнитных цепей в стержнях А, В и С не равны: длина магнитной цепи в среднем стержне В меньше, чем длина крайних магнитных цепей А и С (см. рис. 2.24). Все три цепи сходятся в узлах O_1 и O_2 , а, как известно, геометрическая сумма максимальных значений магнитных

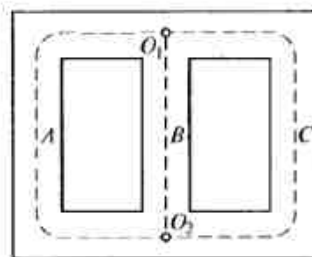


Рис. 2.24. Магнитная система трехстержневого трансформатора: А, В, С — стержни трансформатора; O_1 , O_2 — узлы трансформатора

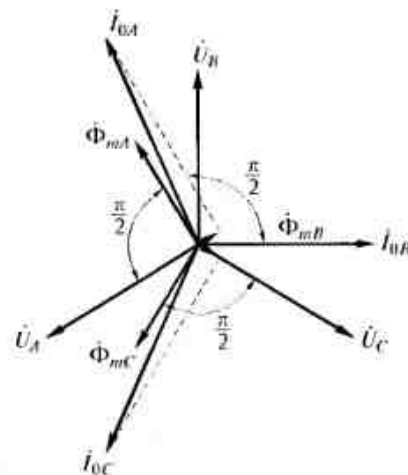


Рис. 2.25. Диаграмма магнитных потоков и токов трехфазного трансформатора

потоков, сходящихся в узлах O_1 и O_2 , должна быть равна нулю, следовательно

$$\Phi_{mA} + \Phi_{mB} + \Phi_{mC} = 0.$$

Если к трехфазному трансформатору подводится симметричное трехфазное напряжение, то можно считать, что потоки Φ_{mA} , Φ_{mB} и Φ_{mC} образуют симметричную трехлучевую звезду (рис. 2.25).

Поскольку путь, проходимый потоком Φ_{mB} , короче, чем пути потоков Φ_{mA} и Φ_{mC} , то МДС отдельных фаз, а стало быть, и токи холостого хода в фазах A , B и C не будут равны между собой по величине и соответственно будут несимметрично расположены: ток I_{0B} в фазе B будет меньше, чем токи I_{0A} и I_{0C} в фазах A и C , и его вектор будет сдвинут относительно векторов в двух других фазах на угол, меньший 120° . Другими словами, токи холостого хода трехстержневого трансформатора образуют несимметричную систему токов.

Несимметрия токов холостого хода сказывается главным образом в трансформаторах малой мощности, где ярмо играет относительно большую роль. Здесь $I_{0A} = I_{0C} = (1,2 \dots 1,5)I_{0B}$. В трансформаторах большой мощности несимметрия сглаживается. За ток холостого хода I_0 принимают среднее арифметическое значение токов I_{0A} , I_{0B} и I_{0C} . В связи с тем что значение тока I_0 невелико (от 3 до 8 % I_n), то даже в трансформаторах малой мощности несимметрия токов холостого хода перестает сказываться уже при очень небольшой нагрузке.

Диаграмма токов, изображенная на рис. 2.25, построена для упрощенного трансформатора, т.е. такого, в котором потери холостого хода равны нулю. В этом случае мощность фазы B равна нулю, так как угол $\varphi_{0B} = 90^\circ$; мощность фазы C положительна, поскольку ток I_{0C} имеет положительную составляющую на направление вектора U_C , а мощность фазы A равна мощности фазы C по величине, но обратна по знаку, так как ток I_{0A} имеет отрицательную составляющую на направление вектора U_A . Таким образом, при холостом ходе трехстержневого трансформатора фазы C и A обмениваются мощностями, но полная мощность холостого хода трансформатора равна нулю. Неодинаковое распределение мощности при холостом ходе, так же как и несимметрия токов, не имеет значения, поскольку эта мощность обычно меньше 1 % номинальной мощности трансформатора.

2.6. Трехфазный трансформатор. Схемы соединений

Каждая из обмоток трехфазного трансформатора — первичная и вторичная — может быть соединена различными способами: звездой, треугольником или зигзагом.

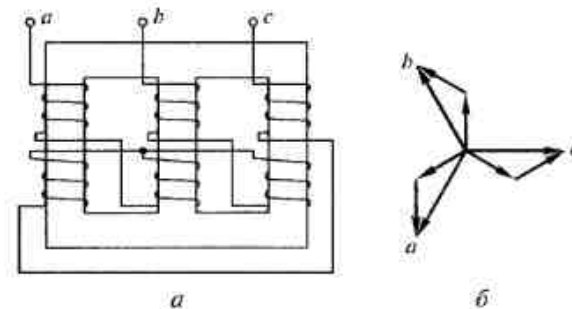


Рис. 2.26. Соединение обмоток трехфазного трансформатора зигзагом a — схема соединений; b — векторная диаграмма

Первые два способа общеизвестны, третий же представляет собой специальный способ соединения. Сущность его состоит в том, что каждую фазную обмотку делят на две, чаще всего равные части и помещают их на разных стержнях (рис. 2.26). Соединение обеих частей производят так, чтобы их ЭДС геометрически вычитались; для этого конец одной половины фазной обмотки соединяют с концом второй половины той же обмотки. Если при этом фазные обмотки разделены пополам, то результирующая ЭДС в $\sqrt{3}$ раз больше ЭДС в каждой половине фазной обмотки (см. рис. 2.26).

Соединения по схеме звезда, треугольник и зигзаг обозначают соответственно Y , Δ и Z .

Способ соединения обмотки ВН пишется сверху, а способ соединения обмотки НН — снизу, между этими обозначениями ставится наклонная черта.

Если обмотка имеет выведенную нулевую точку, то к соответствующему символу приписывается цифра ноль «0». Таким образом, обозначение Y_0/Δ следует читать так: обмотка ВН соединена по схеме звезда и имеет выведенную нулевую точку, обмотка НН соединена по схеме треугольник.

Способы соединения Z/Y , Z/Δ и Z/Z не применяются. Таким образом, практически возможны следующие шесть способов соединения обмоток трансформатора: 1) Y/Y или Y/Y_0 ; 2) Y/Δ ; 3) Y/Z или Y/Z_0 ; 4) Δ/Y ; 5) Δ/Δ и 6) Δ/Z или Δ/Z_0 .

Поскольку одна из обмоток может быть «вывернута» относительно другой, т.е., например, намотана в другую сторону, то всего можно получить 12 различных способов соединения обмоток.

В России применяются только три способа соединения обмоток: Y/Y_0 ; Y/Δ и Y_0/Δ (табл. 2.1). При пользовании этими схемами нужно иметь в виду следующее: начала фазных обмоток, при-

Таблица 2.1

Схемы соединения обмоток		Диаграммы векторов		Условное обозначение
ВН	НН	ВН	НН	
				$Y/Y_0 - 0$
				$Y/Δ - 11$
				$Y_0/Δ - 11$

соединяемые к внешним зажимам трансформатора, обозначаются латинскими заглавными буквами A, B, C (в случае обмотки ВН) и строчными латинскими буквами a, b, c (в случае обмотки НН); соответственно концы фазных обмоток обозначаются буквами X, Y, Z и x, y, z ; выведенная нулевая точка обозначается нулем.

При построении векторных диаграмм линейные напряжения обмотки ВН (штриховые линии в табл. 2.1) изображаются во всех случаях равнобедренными треугольниками напряжений ABC , причем его вершины A, B и C находятся соответственно в нижнем левом, в верхнем и в нижнем правом углах. При этом если бы обмотка ВН была соединена треугольником, то стороны треугольника напряжений ABC определили бы собой в одно и то же время фазные и линейные напряжения этой обмотки. Если же обмотка ВН была соединена звездой, как это имеет место в схемах, то между линейными и фазными напряжениями существует сдвиг по фазе на угол 30° .

Угол 30° условно принят за единицу, и в соответствии с этим разработан способ цифрового обозначения групп соединений обмоток трансформаторов.

2.7. Группы соединений обмоток трансформаторов

Обозначение группы, к которой принадлежит трансформатор, имеет важное значение, поскольку группой трансформатора определяется угол сдвига между вторичным и первичным линейными напряжениями. Этот угол зависит от направления, в котором намотана обмотка, способа обозначения зажимов обмоток, т. е. их маркировки, и способа соединения обмоток трехфазных трансформаторов.

Выясним влияние двух первых факторов на примере однофазного трансформатора. Будем считать, что верхняя обмотка трансформатора, изображенного на рис. 2.27, является первичной обмоткой, а нижняя — вторичной. Предположим, что обе обмотки намотаны в одну и ту же сторону и что их верхние зажимы приняты за начала обмоток и обозначены буквами A и a , а нижние зажимы X и x — за концы обмоток.

Поскольку обе обмотки трансформатора располагаются на одном и том же стержне и пронизываются одним и тем же основным потоком, то индуцируемые в обмотках ЭДС имеют в любой момент времени одинаковое (относительно зажимов обмоток) направление, например от начала A к концу X в первичной обмотке и от начала a к концу x во вторичной обмотке. Соответственно этому напряжения U_1 и U_2 на зажимах первичной и приведенной к первичной вторичной обмотках трансформатора совпадают по фазе и изображаются двумя векторами OA и Oa , равными по величине и одинаково направленными (см. рис. 2.27).

Если первичная и вторичная обмотки намотаны в разные стороны, но сохраняют то же обозначение зажимов, что и на

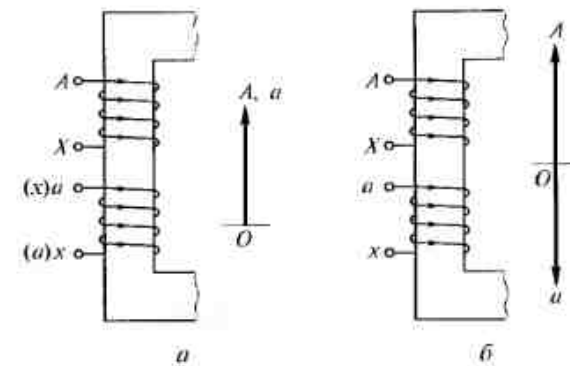


Рис. 2.27. Угол сдвига ЭДС в зависимости от направления намотки и обозначения зажимов обмотки:

a — при совпадении фаз; b — при сдвиге фаз на 180°

рис. 2.27, *a*, то, как это видно на рис. 2.27, *б* напряжения \dot{U}_1 и \dot{U}_2 относительно зажимов первичной и вторичной обмоток направлены в разные стороны, например от *A* к *X* в первичной обмотке и от *x* к *a* во вторичной обмотке. Соответственно этому напряжения \dot{U}_1 и \dot{U}_2 должны быть изображены векторами *OA* и *Oa*, направленными в разные стороны (см. рис. 2.27, *б*).

Тот же результат можно получить, если оставить этот же способ намотки обмоток, но изменить маркировку вторичной обмотки, присоединив ее верхний конец к зажиму *x*, а нижний к зажиму *a* или поменяв местами обозначения ее зажимов (соответствующие буквы поставлены в скобках на рис. 2.27, *a*). В этом случае первичное напряжение было бы направлено в одну сторону, например от зажима *A* к зажиму *X*, а вторичное напряжение в другую — от зажима *x* к зажиму *a*.

Таким образом, принимая вектор *OA* первичного напряжения за исходный, можно констатировать, что вектор *Oa* вторичного напряжения однофазного трансформатора либо совпадает с вектором *OA* по фазе, либо находится с ним в противофазе; в первом случае вектор *Oa* смещен относительно вектора *OA* на угол $\alpha = 0$, а во втором — на угол $\alpha = 180^\circ$.

Вместо того чтобы выражать угол сдвига между напряжениями в градусах, удобнее воспользоваться часовым способом обозначения угла. Для этого вектор *OA* первичного линейного напряжения принимают за большую стрелку часов и устанавливают на цифре 12 циферблата, а вектор *Oa* вторичного линейного напряжения принимают за малую стрелку часов и устанавливают на циферблате соответственно положению вектора *Oa* относительно вектора *OA*.

Если векторы *OA* и *Oa* совпадают по фазе, как на рис. 2.27, *a*, то малую стрелку часов следует установить, как и большую стрелку, на той же цифре 12 (рис. 2.28). Угол сдвига между стрелками часов равен, очевидно, нулю. Цифра (0) и определяет собой группу (0), к которой в данном случае принадлежит трансформатор.

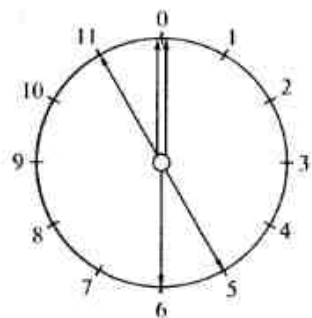


Рис. 2.28. Часовое обозначение группы соединений

Если векторы *OA* и *Oa* находятся в противофазе, как это показано на рис. 2.27, *б*, то малую стрелку часов нужно установить на цифре 6 циферблата, что соответствует углу сдвига $30^\circ \times 6 = 180^\circ$. В этом случае группа трансформатора определяется цифрой 6.

Рассмотрим вопрос о группах соединений трехфазных трансформаторов.

Предположим, что обе обмотки трансформатора соединены по схеме звезда, намотаны в одну сторону и имеют одинаковые обозначения зажимов (см. рис. 2.27, *a*). Обмотку ВН будем считать первичной обмоткой, а обмотку НН — вторичной. Системы линейных и фазных первичных и вторичных напряжений предполагаются симметричными. Поскольку вторичная обмотка повторяет собой первичную, то схема соединения треугольник *abc* вторичных линейных напряжений и схема соединения звезда *ax, by* и *cz*, вторичных фазных напряжений совпадают соответственно по фазе с треугольником *ABC* и звездой *AX, BY* и *CZ* линейных и фазных первичных напряжений (рис. 2.29). Таким образом, угол сдвига вторичного линейного напряжения относительно первичного равен нулю, следовательно, трансформатор принадлежит к группе Y/Y_0-0 ($\alpha = 0^\circ$).

Если намотаем обмотку НН в обратном направлении относительно обмотки ВН или поменяем местами ее начала и концы, то при соединении обеих обмоток звездой треугольник напряжений *abc* повернется относительно треугольника *ABC* на 180° , т. е. $30^\circ \times 6$ (рис. 2.30). В этом случае вторую стрелку часов надо установить на цифре 6 циферблата (см. рис. 2.28). Следовательно, данное соединение обмоток относится к группе 6 и записывается в виде $Y/Y-6$ или Y/Y_0-6 .

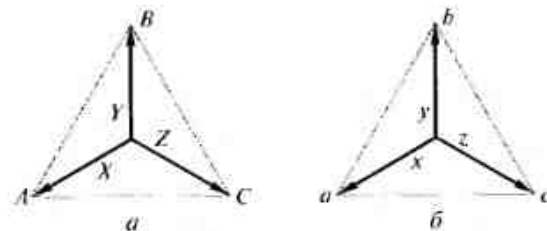


Рис. 2.29. Фазные (*a*) и линейные (*б*) напряжения первичных и вторичных обмоток трансформатора при соединении обмоток Y/Y_0-0

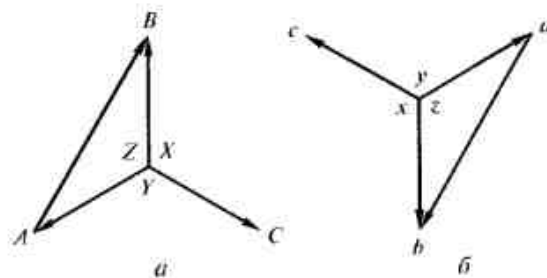


Рис. 2.30. Фазные (*a*) и линейные (*б*) напряжения первичных и вторичных обмоток трансформатора при соединении обмоток Y/Y_0-6

Схема соединения обмоток и группа трансформаторов	Напряжение обмоток		Мощность трансформатора, кВ·А
	ВН, кВ	НН, В	
$Y/Y_0 - 0$	До 35 включительно	230 400	До 560 включительно До 1 800 включительно
$Y/\Delta - 11$	До 35 включительно	525 Свыше 525	До 1 800 включительно До 5 600 включительно
$Y_0/\Delta - 11$	110 и выше	3 150 и выше	3 200 и выше
	6,3 и выше	3 300 и выше	7 500 и выше

Рассмотрим схему соединения звезда—треугольник (см. табл. 2.1). Здесь обмотка НН соединена по схеме $a-x-c-z-b-y-a$. Стороны AB , BC и CA треугольника напряжений ABC представляют собой линейные напряжения обмотки ВН, а лучи звезды того же треугольника — фазные напряжения этой обмотки. Если обмотки ВН и НН намотаны в одном направлении и имеют одинаковое обозначение зажимов, то векторы фазных напряжений обеих обмоток совпадают. Поэтому при построении схемы соединения треугольника abc нужно провести из точки a (рис. 2.31), находящейся в левом нижнем углу, вектор ax параллельно вектору AX , затем из точки c , которую нужно совместить с точкой x , следует провести вектор cz параллельно вектору CZ и, наконец, из точки b , которую нужно совместить с точкой z , следует провести вектор by параллельно вектору BY тем самым замыкая треугольник abc . Сопоставляя положение треугольников ABC и abc (например, стороны AB и ab), видно, что второй треугольник повернут относительно первого по направлению вращения часовой стрелки на $330^\circ = 30^\circ \times 11$. Следовательно, данное соединение обмоток относится к группе 11 и пишется в виде $Y/\Delta - 11$.

Если бы обмотка НН была намотана в обратном направлении относительно обмотки ВН или поменяли местами ее начала и концы, то треугольник abc повернулся бы относительно треугольника ABC на $150^\circ = 30^\circ \times 5$. Следовательно, такое соединение обмоток дает группу 5 и записывается в виде $Y/\Delta - 5$. Нетрудно показать, что если соединить обмотку НН по схеме $a-x-b-y-c-z-a$, то при одинаковом направлении намотки и одинаковом обозначении зажимов получим группу $Y/\Delta - 1$.

Группы 0, 6, 11 и 5 считаются основными. Из них можно получить ряд производных групп, например 4, 8, 10, 2 и т.д. Для этого нужно только переместить зажимы обмотки НН относительно ВН.

Рассмотрим области применения при различных группах соединения обмоток трансформаторов. Соединение $Y/Y_0 - 0$ приме-

няется в тех случаях, когда нагрузка носит смешанный осветительно-силовой характер. Двигатели включаются на линейное напряжение 230 или 400 В, а лампы — между линейными и нулевым проводом. Поскольку при заданном напряжении ток растет пропорционально мощности, то во избежание затруднений, связанных с устройством обмотки на большие токи, стандарт ограничивает мощности трансформаторов при соединении $Y/Y_0 - 0$ пределами, указанными в табл. 2.2. Если при этом нагрузка не равномерна, то ток в нулевом проводе трансформатора не должен превосходить 25 % номинального тока обмотки НН.

В случае, когда вторичное напряжение выше 400 В, стандартом предусмотрено соединение обмоток по способу $Y/\Delta - 11$. Как следует из дальнейшего, соединение одной из обмоток по схеме треугольник оказывает положительное влияние на условия работы трансформатора.

Последняя группа трансформаторов, указанных в табл. 2.2, используется главным образом в линиях передач. Соединение обмоток этих трансформаторов предусматривает возможность заземления системы на стороне высшего напряжения.

2.8. Работа трехфазных трансформаторов в режиме холостого хода

Рассмотрим трансформаторную группу, состоящую из трех одинаковых однофазных трансформаторов, обмотки которых соединены по схеме $Y/Y - 0$ (рис. 2.32). Основное, что отличает работу такой трансформаторной группы при холостом ходе от работы однофазного трансформатора при холостом ходе, состоит в том, что в ней нет третьих гармонических тока. Действительно, выражения для третьих гармонических тока трехфазной системы записываются в следующем виде:

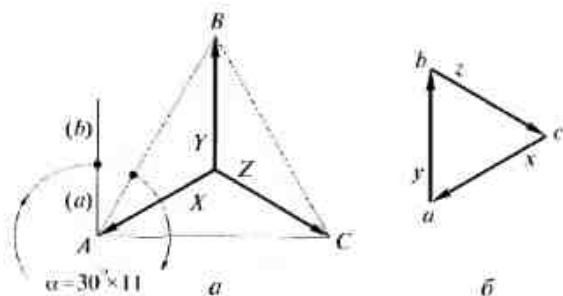


Рис. 2.31. Фазные (а) и линейные (б) напряжения первичных и вторичных обмоток трансформатора при соединении обмоток $Y/\Delta - 11$

$$I_{03A} = I_{03m} \sin 3\omega t;$$

$$I_{03B} = I_{03m} \sin 3(\omega t - 120^\circ) = I_{03m} \sin 3\omega t;$$

$$I_{03C} = I_{03m} \sin 3(\omega t - 240^\circ) = I_{03m} \sin 3\omega t.$$

Таким образом, третьи гармонические токов всех трех фаз совпадают по фазе во времени. Это значит, что если, например, в фазе $A-X$ третья гармоническая тока направлена в данный момент от начала фазы A к ее концу X , то и в фазах $B-Y$ и $C-Z$ третьи гармонические тока тоже направлены от начала фазных обмоток B и C к их концам Y и Z .

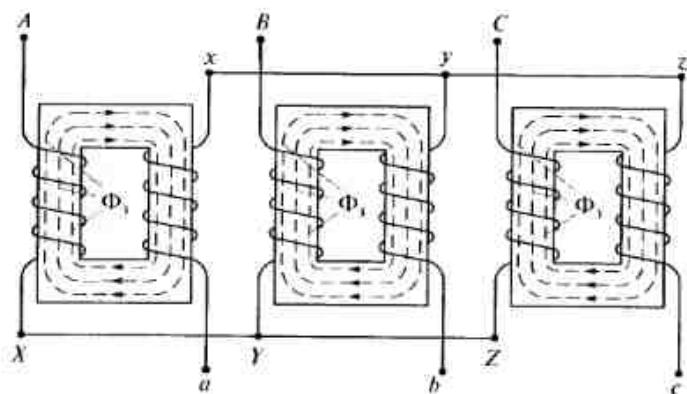


Рис. 2.32. Трансформаторная группа при соединении обмоток $Y/Y-0$

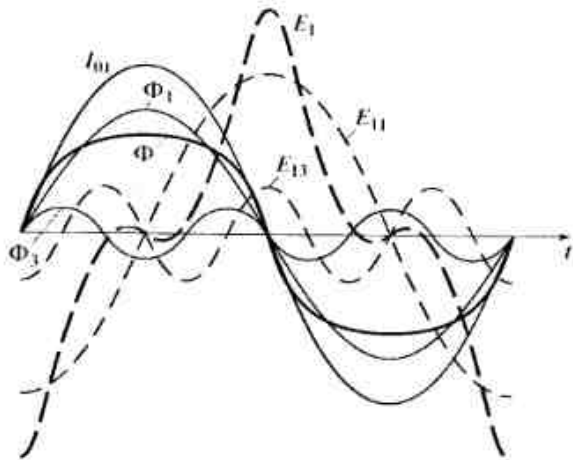


Рис. 2.33. Ток и поток холостого хода трехфазного группового трансформатора при соединении обмоток $Y/Y-0$

При соединении обмотки по схеме звезда соединяются в общую точку либо концы обмоток X, Y, Z , либо их начала A, B, C . Поэтому в каждом из трех образуемых схемой соединения звезда контуров должны были бы течь два равных по величине, но встречно направленных тока третьей гармонической, что физически невозможно.

Отсутствие третьей гармонической в кривой тока холостого хода имеет существенные последствия. В этом случае как бы срезается верхушка тока и его кривая приближается к синусоиде (рис. 2.33); но при этом соответственно срезается и верхушка магнитного потока, т.е. кривая потока превращается из синусоидальной в уплощенную (толстая сплошная кривая на рис. 2.33). Разложив эту кривую в гармонический ряд, можно видеть, что в кривой потока наряду с первой гармонической Φ_1 (тонкие сплошные линии на рис. 2.33) имеется и третья гармоническая Φ_3 . Каждый из этих потоков создает ЭДС как в первичной, так и во вторичной обмотках трансформатора, причем создаваемые потоками ЭДС отстают от них по фазе на 90° . На рис. 2.33 тонкими прерывистыми линиями показаны ЭДС E_{11} и E_{13} , создаваемые потоками Φ_1 и Φ_3 в первичной обмотке.

Поскольку магнитные цепи трансформаторов, образующих группу, представляют собой независимые друг от друга и замкнутые на себя контуры, то третьи гармонические потоки идут по сердечникам (штриховые линии на рис. 2.32). Налагаясь на потоки первой гармонической, они могут резко исказить форму кривых фазных напряжений. При этом амплитуды первой и третьей гармонической ЭДС складываются. В современных трансформаторах амплитуда третьей гармонической ЭДС нередко составляет 50...60% амплитуды основной волны, что повышает на 50...60% максимальное значение фазного напряжения и на 12...17% его действующее значение. Такое повышение напряжения нежелательно и во многих случаях опасно. Поэтому в мощных высоковольтных трансформаторах соединение Y/Y не применяется.

Несмотря на резкое искажение кривых фазных напряжений линейные вторичные напряжения остаются синусоидальными, так как третьи гармонические ЭДС в линейных напряжениях исчезают по той же причине, что и третьи гармонические токи.

Иначе обстоит дело в трехстержневом трансформаторе, в котором магнитные цепи представляют связанную систему. Действительно, потоки третьих гармонических во всех трех фазах, так же как и токи, совпадают во времени. Это значит, что потоки третьих гармонических в каждый момент времени равны друг другу по величине и в стержнях трансформатора направлены все в одну и ту же сторону, например вверх, как это показано на рис. 2.34. Поток третьей гармонической в каком-нибудь одном стержне, например в первом, не может замкнуться ни через второй, ни через

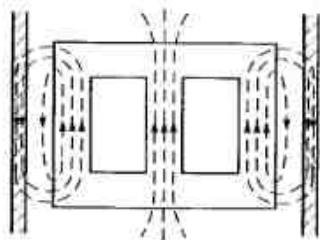


Рис. 2.34. Третьи гармонические потоки в трехстержневом трансформаторе

третий стержни, так как в каждом из них он встречает поток третьей гармонической, направленный ему навстречу. Это приводит к тому, что линии третьей гармонической потока во всех трех фазах выступают из сердечника и замыкаются от ярма к ярму через воздух. Этот путь имеет большое магнитное сопротивление: поэтому потоки третьей гармонической невелики и при нормальных насыщениях стали кривые фазных напряжений, как правило, остаются практически синусоидальными.

Потоки третьей гармонической, замыкаясь через воздух, пульсируют с частотой $3f_1$. Они стремятся идти по пути наименьшего сопротивления, используя для этого стенки бака, стяжные болты и т.д. В результате в этих частях возникают вихревые токи, вызывающие местные нагревы и понижающие отдачу трансформатора.

При индукциях в стержне порядка 1,4 Тл потери в баке составляют около 10% потерь в сердечнике, при увеличении индукции в стержне потери в баке быстро растут и при индукции 1,65 Тл достигают 50...65% потерь в сердечнике.

При соединении обмоток по схеме треугольник начало каждой следующей обмотки присоединяется к концу предыдущей. В этом случае первичный треугольник трансформатора представляет собой контур, по которому все три тока третьей гармонической текут в одном направлении (рис. 2.35). Если в токе холостого хода присутствует третья гармоническая, то формы кривых магнитного потока и соответственно первичная и вторичная ЭДС приближаются к синусоиду, что является большим преимуществом соединения обмоток по схеме Δ/Y перед соединением по схеме Y/Y .

Рассмотрим случай холостого хода трансформатора при соединении обмоток по схеме Y/Δ . То обстоятельство, что здесь, в противоположность соединению Δ/Y , по схеме звезда соединена пер-

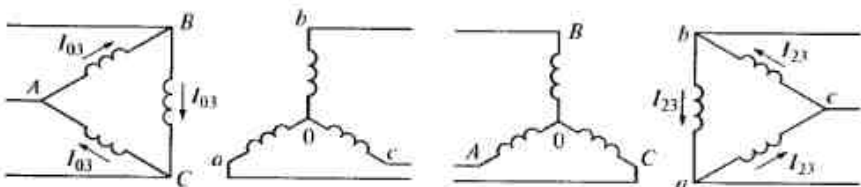


Рис. 2.35. Третьи гармонические токи холостого хода при соединении обмоток трансформатора по схеме Δ/Y

Рис. 2.36. Третьи гармонические токи холостого хода при соединении обмоток трансформатора по схеме Y/Δ

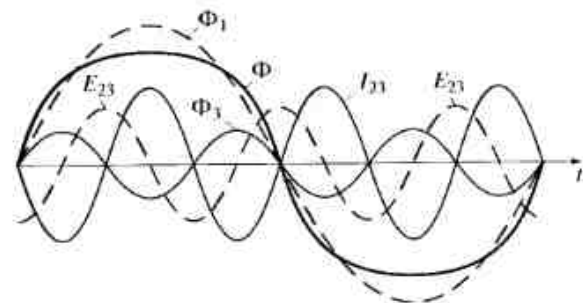


Рис. 2.37. Магнитный поток и ЭДС при соединении обмоток трансформатора по схеме Y/Δ

вичная обмотка, а по схеме треугольник вторичная (рис. 2.36), не имеет существенного значения. Действительно, при соединении первичной обмотки по схеме звезда из кривой тока холостого хода выпадает третья гармоническая и кривая потока приобретает уплощенную форму (рис. 2.37). Третья гармоническая потока Φ_3 индуцирует в каждой из фаз вторичной обмотки третью гармоническую ЭДС E_{23} , отстающую от потока Φ_3 по фазе на 90° . Эта ЭДС создает токи I_{23} , замыкающиеся по вторичному треугольнику (см. рис. 2.36) и отстающие от ЭДС E_{23} почти на 90° , так как контур вторичной обмотки имеет значительное индуктивное сопротивление. Ток I_{23} находится в противофазе с третьей гармонической потока, т.е. создает поток, компенсирующий поток Φ_3 ; вследствие этого кривые результирующего потока и соответственно ЭДС приближаются к синусоиде.

Таким образом, схема соединения Y/Δ , так же как и схема соединения Δ/Y , защищает трансформатор от вредных воздействий третьих гармонических потоков и ЭДС.

2.9. Режим короткого замыкания трансформаторов

Режимы холостого хода и короткого замыкания являются режимами работы трансформатора при разомкнутой вторичной обмотке или при замкнутой накоротку. Рассмотрев эти режимы, проще перейти к изучению режимов работы трансформаторов под нагрузкой.

Если при коротком замыкании трансформатора к зажимам его первичной обмотки подводится номинальное или близкое к нему напряжение, то токи короткого замыкания в обмотках трансформатора достигают значений, превышающих номинальные токи об-

моток в 10—20 и более раз. Короткое замыкание трансформатора возможно в эксплуатационных условиях и поэтому его называют *эксплуатационным*. Оно представляет большую опасность для трансформатора как вследствие возникающих в нем весьма значительных механических усилий, так и вследствие чрезмерного повышения температуры обмоток. Поэтому трансформатор должен обладать необходимой механической прочностью и в его схеме должна быть предусмотрена защита, способная отключить от сети короткозамкнутый трансформатор по прошествии некоторого, обычно весьма короткого, промежутка времени. Если защита почему-либо не сработает, то трансформатор потерпит аварию.

Другим видом короткого замыкания трансформатора является опыт короткого замыкания, который производится при соответственно пониженном напряжении U_k и имеет целью получить данные короткого замыкания. Такой вид короткого замыкания называют *испытательным*.

Предположим, что при коротком замыкании понизили подводимое к трансформатору напряжение до такого значения $U_{k,ном}$ при котором токи в обмотках трансформатора равны номинальным. Если выразим это напряжение в процентном отношении от соответствующего номинального напряжения $U_{ном}$, то получим так называемое *напряжение короткого замыкания* u_k , %, т.е.

$$u_k = \frac{U_{k,ном}}{U_{ном}} 100. \quad (2.24)$$

Напряжение короткого замыкания имеет важное значение и всегда указывается на заводском щитке трансформатора.

В табл. 2.3 приведены значения u_k для трехфазных двухобмоточных трансформаторов. Из табл. 2.3 следует, что напряжение короткого замыкания тем больше, чем больше мощность трансформатора и его напряжение.

Рассмотрим физические условия работы трансформатора при коротком замыкании. Предположим, что короткое замыкание производится в условиях, близких к испытательному короткому за-

мыканию, т.е. будем считать, что к зажимам первичной обмотки короткозамкнутого трансформатора подводится напряжение $U_k = U_{кн}$ и что, следовательно, первичный I_1 и вторичный I_2 токи и не выходят за пределы, близкие к их номинальным значениям. Токи I_1 и I_2 создают первичную и соответственно вторичную МДС $F_1 = I_1 w_1$ и $F_2 = I_2 w_2$, которые вступают во взаимодействие и образуют в сердечнике трансформатора основной магнитный поток Φ_k , сцепленный с обеими обмотками. Кроме того, МДС F_1 образует *первичный поток рассеяния* $\Phi_{1,1}$, сцепленный только с первичной обмоткой, а МДС F_2 — *вторичный поток рассеяния* $\Phi_{2,2}$, сцепленный только со вторичной обмоткой (рис. 2.38). Действительная картина распределения магнитного поля в трансформаторе сложнее, чем изображенная на рис. 2.38, поскольку не учтено влияние добавочных факторов — стенок бака, ярем, близлежащих обмоток и т.д. Упрощение сложной физической картины явления необходимо для последующего анализа.

При рассмотрении взаимодействия МДС F_1 и F_2 в сердечнике трансформатора можно исходить из закона равновесия МДС. При этом следует иметь в виду, что к трансформатору подводится напряжение u_k , составляющее всего 5...10% от U_n . В соответствии с этим основной поток Φ_k и МДС F_{0k} , необходимая для создания этого потока, уменьшаются до нескольких процентов от тех значений, которые они имеют при холостом ходе и номинальном напряжении. На этом основании можно пренебречь МДС F_{0k} и считать, что действующие по контуру сердечника МДС F_1 и F_2 *находятся во взаимном равновесии*. Следовательно,

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{I}_1 w_1 + \vec{I}_2 w_2 = 0, \quad (2.25)$$

или

$$\vec{F}_1 = \vec{I}_1 w_1 = -\vec{F}_2 = -\vec{I}_2 w_2. \quad (2.26)$$

Уравнения (2.25) и (2.26), называемые *уравнениями равновесия* МДС при коротком замыкании, имеют важное значение для понимания работы трансформатора при коротком замыкании.

Если иметь в виду только абсолютные значения токов I_1 и I_2 , то

$$I_1 = I_2 \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k} I_2. \quad (2.27)$$

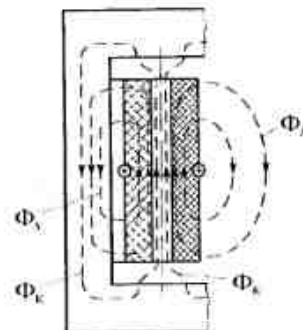


Рис. 2.38. Поток рассеяния в трансформаторе с concentрической обмоткой при коротком замыкании

Таблица 2.3

Мощность, кВ·А	Номинальное ВН, кВ	u_k , %
5—5 600	6,3 и 10	5,5
50—2 400	35	6,5
3 200 и 4 200	35	7,0
5 600—10 000	35—38,5	7,5
15 000—31 500	35—38,5	8,0
3 200—31 500	110—121	10,5

т.е. отношение между токами при коротком замыкании трансформатора определяется, так же как и отношение между ЭДС при холостом ходе, коэффициентом трансформации.

Рассмотрим ЭДС, действующие в первичной и вторичной обмотках трансформатора. Поскольку основной поток Φ_m пронизывает обе обмотки трансформатора, то он индуцирует в них ЭДС E_1 и E_2 , отстающие каждая от Φ_m по фазе на 90° . Наряду с основным потоком Φ_m существует первичный и вторичный потоки рассеяния Φ_{s1} и Φ_{s2} , создающие первичную и вторичную ЭДС рассеяния E_{s1} и E_{s2} , каждая из которых отстает по фазе от соответствующего потока на 90° . В связи с тем что потоки рассеяния распределяются главным образом в немагнитной среде, можно считать, что они совпадают с соответствующими МДС и токами по фазе и пропорциональны им по величине, т.е. $\Phi_{s1} \equiv I_1$ и $\Phi_{s2} \equiv I_2$. На этом основании уравнения ЭДС рассеяния можно записать в следующем виде:

$$\dot{E}_{s1} = -j\dot{I}_1 X_1; \quad (2.28)$$

$$\dot{E}_{s2} = -j\dot{I}_2 X_2, \quad (2.29)$$

где X_1 и X_2 — индуктивные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора, обусловленные первичным и вторичным потоками рассеяния.

Кроме индуктивных сопротивлений обмотки трансформатора обладают еще активными сопротивлениями R_1 и R_2 . При прохождении по ним токов I_1 и I_2 в них возникают силы противодействия E_{R1} и E_{R2} , которые будем называть ЭДС активного сопротивления:

$$\dot{E}_{R1} = -\dot{I}_1 R_1; \quad (2.30)$$

$$\dot{E}_{R2} = -\dot{I}_2 R_2. \quad (2.31)$$

Таким образом, в первичной обмотке действуют четыре ЭДС: подведенное напряжение U_k и три ЭДС, возникающие в процессе работы трансформатора. Взаимозависимость между этими ЭДС устанавливается, так же как и при холостом ходе, на основе закона равновесия ЭДС:

$$\dot{U}_k = -(\dot{E}_1 + \dot{E}_{s1} + \dot{E}_{R1}). \quad (2.32)$$

Этому уравнению можно придать другой вид, для чего достаточно подставить вместо E_{s1} и E_{R1} их выражения по формулам (2.28) и (2.30):

$$\dot{U}_k = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 X_1 + \dot{I}_1 R_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (X_1 + jR_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1, \quad (2.33)$$

где Z_1 — полное сопротивление первичной обмотки, $Z_1 = R_1 + jX_1$.

Составляющие напряжения $I_1 R_1$ и $jI_1 X_1$, первая из которых совпадает по фазе с током I_1 , а вторая опережает его на 90° , принято называть активными и индуктивными падениями напряжения в первичной обмотке.

Вторичная обмотка при коротком замыкании замкнута сама на себя, поэтому три действующие в ней ЭДС E_{s2} и E_{R2} должны находиться во взаимном равновесии, т.е.

$$0 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{s2} + \dot{E}_{R2}.$$

Это уравнение можно записать в другой форме:

$$0 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 X_2 - \dot{I}_2 R_2$$

или

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 (R_2 + jX_2) = \dot{I}_2 Z_2, \quad (2.34)$$

где Z_2 — полное сопротивление вторичной обмотки, $Z_2 = R_2 + jX_2$; $I_2 R_2$ и $jI_2 X_2$ — составляющие ЭДС \dot{E}_2 , называемые активными и индуктивными падениями напряжения во вторичной обмотке; активная совпадает по фазе с током I_2 , а индуктивная опережает его на 90° .

Уравнения (2.32) — (2.34) называются уравнениями равновесия ЭДС, или уравнениями ЭДС.

Для анализа и количественного учета процессов, происходящих в трансформаторе, используют способ, при котором обе обмотки трансформатора приводятся к одному числу витков. Обычно приводят вторичную обмотку к первичной. Для этого пересчитывают вторичную обмотку, имеющую число витков w_2 , на эквивалентную ей приведенную обмотку, имеющую число витков w_1 . Эта операция не должна отразиться на режиме работы первичной цепи. Все величины, относящиеся к приведенной вторичной обмотке, называются приведенными и обозначаются теми же символами, что и действительные величины, но со штрихом сверху — E'_2 , I'_2 , R'_2 и т.д.

Чтобы получить приведенную E'_2 , нужно изменить ЭДС E_2 в отношении чисел витков первичной w_1 и вторичной w_2 обмоток, т.е. пропорционально коэффициенту трансформации:

$$E'_2 = \frac{w_1}{w_2} E_2 = k E_2 = E_1. \quad (2.35)$$

В таком же соотношении изменяются и другие ЭДС вторичной обмотки трансформатора, т.е. ЭДС E_{s2} и E_{R2} .

При приведении вторичной обмотки к первичной ее кажущаяся мощность должна остаться без изменения, т.е. $E'_2 I'_2 = E_2 I_2$. Отсюда

$$I'_2 = \frac{E_2}{E'_2} I_2 = \frac{1}{k} I_2, \quad (2.36)$$

т.е. чтобы получить I_2' , нужно изменить ток I_2 обратно пропорционально коэффициенту трансформации.

Поскольку при приведении вторичной обмотки к первичной мощности не изменяются, то потери в меди в действительной и приведенной вторичной обмотках должны быть равны. Следовательно,

$$I_2'^2 R_2' = I_2^2 R_2,$$

откуда

$$R_2' = \left(\frac{I_2}{I_2'}\right)^2 R_2 = k^2 R_2. \quad (2.37)$$

т.е. чтобы получить R_2' , нужно изменить сопротивление R_2 пропорционально квадрату коэффициента трансформации.

Коэффициент самоиндукции L_2 , а следовательно, и индуктивное сопротивление обмотки зависят от квадрата числа витков. Действительно, коэффициент самоиндукции обмотки определяется числом ее потокоцеплений, равным произведению числа витков обмотки на число сцеплений с витками магнитных линий потока, создаваемого током силой 1 А. Если число витков увеличивается в k раз, то $L = w\Phi_1$ увеличивается в k^2 раз.

Таким образом,

$$X_2' = \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 X_2 = k^2 X_2, \quad (2.38)$$

т.е., чтобы получить X_2' , нужно изменить X_2 , так же как и R_2 , пропорционально квадрату коэффициента трансформации. В дальнейшем будем иметь в виду только приведенный трансформатор.

Построим векторную диаграмму для приведенного трансформатора. Пусть OT — основной поток при коротком замыкании Φ_k (рис. 2.39). Создаваемые этим потоком ЭДС \dot{E}_1 и $\dot{E}_1' = \dot{E}_1'$ отстают от потока Φ_k на 90° и показаны на диаграмме вектором OF . К вектору \dot{E}_2' под углом $\psi_{2k} = \arctg\left(\frac{X_2'}{R_2'}\right)$ проводится вектор тока $\dot{I}_2' = OL$. Поскольку при коротком замыкании МДС $\dot{F}_1 = -\dot{F}_2$, то в приведенном трансформаторе имеем

$$\dot{I}_1 w_1 = -\dot{I}_2 w_2 = -\dot{I}_2' w_1,$$

откуда

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2', \quad (2.39)$$

т.е. в короткозамкнутом приведенном трансформаторе токи \dot{I}_1 и \dot{I}' равны по величине, но направлены в противоположные стороны. Следовательно, ток

$$\dot{I}_1 = ON = -OL$$

На рис. 2.39 ЭДС $\dot{E}_{\dot{1}}$, \dot{E}_{R1} , \dot{E}_{X2} , и \dot{E}_{R2} изображены в соответствии с установленным ранее: ЭДС $\dot{E}_{\dot{1}}$ и \dot{E}_{X2} отстают от соответствующих токов по фазе на 90° , а ЭДС \dot{E}_{R1} и \dot{E}_{R2} находятся с ними в противофазе. На рис. 2.39, в построен треугольник вторичных ЭДС OFD путем геометрического суммирования ЭДС $\dot{E}_2' = \overline{OF}$, $\dot{E}_{X2}' = -j\dot{I}_2' X_2' = \overline{FD}$ и $\dot{E}_{R2}' = -\dot{I}_2' R_2' = \overline{DO}$. Можно пользоваться и уравнением $\dot{E}_2' = \dot{I}_2' R_2' + j\dot{I}_2' X_2'$, в этом случае строим не ЭДС \dot{E}_{X2}' и \dot{E}_{R2}' , а равные им по величине, но направленные в обратную сторону векторы активного и индуктивного падения напряжения во второй обмотке $OD = \dot{I}_2' R_2'$, и $DF = j\dot{I}_2' X_2'$ как составляющие ЭДС \dot{E}_2' . Вектор первичного напряжения $OA = \dot{U}_k$ строится проще всего по трем его составляющим $-OG = -\dot{E}_1$, $GK = \dot{I}_1 R_1$ и $KA = j\dot{I}_1 X_1$, каждая из которых равна соответствующей ЭДС по величине, но обратна ей по направлению. Фаза тока \dot{I}_1 относительно напряжения \dot{U}_k определяется углом ϕ_k .

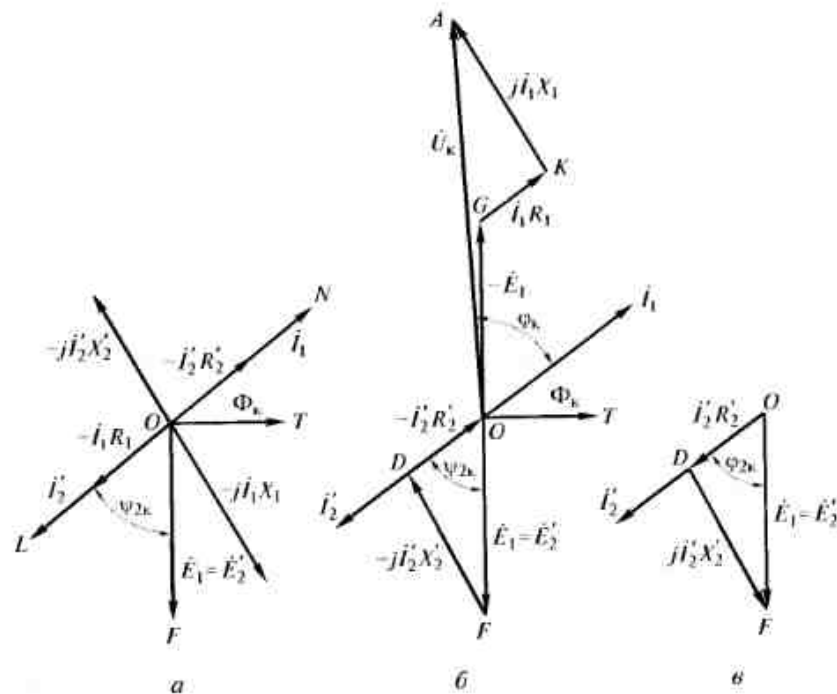


Рис. 2.39. Векторные диаграммы при коротком замыкании приведенного трансформатора:

а — диаграмма ЭДС; б — векторная диаграмма ЭДС и токов; в — треугольник вторичных напряжений

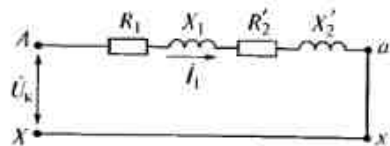


Рис. 2.40. Схема соединения трансформатора при коротком замыкании

Трансформатор при коротком замыкании можно заменить цепью, состоящей из последовательно соединенных сопротивлений $Z_1 = R_1 + jX_1$ и $Z_2' = R_2' + jX_2'$, к которой приложено напряжение U_k (рис. 2.40). Такая цепь представляет собой схему замещения трансформатора при коротком замыкании.

Схема замещения, приведенная на рис. 2.40, позволяет перестроить диаграмму, изображенную на рис. 2.39, в треугольник короткого замыкания, отличающийся простотой и наглядностью. Для этого направим вектор тока I_1 в положительном направлении оси ординат (рис. 2.41) и построим падения напряжения $I_1 Z_1$ и $I_1 Z_2'$. Треугольник OBA называется треугольником короткого замыкания. Его катеты OB и BA представляют собой активную и индук-

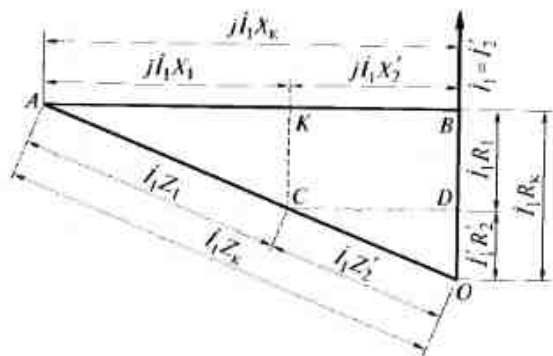


Рис. 2.41. Треугольник короткого замыкания трансформатора

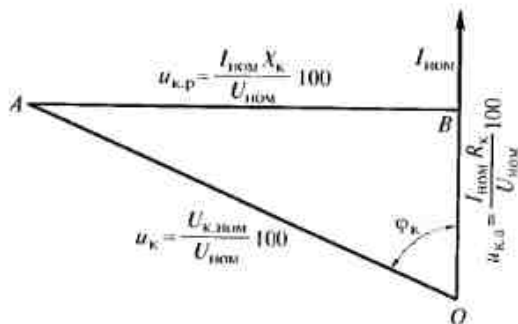


Рис. 2.42. Основной треугольник короткого замыкания

тивную составляющие напряжения \dot{U}_k и называются активным и индуктивным падением напряжения трансформатора.

На диаграмме, изображенной на рис. 2.41, видно, что

$$OB = I_1 R_1 + I_1 R_2' = I_1 (R_1 + R_2') = I_1 R_k;$$

$$BA = I_1 X_1 + I_1 X_2' = I_1 (X_1 + X_2') = I_1 X_k;$$

$$OA = \sqrt{OB^2 + BA^2} = I_1 \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = I_1 Z_k,$$

и

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{BA}{OB} = \frac{X_k}{R_k}.$$

Сопротивления $R_k = R_1 + R_2'$, $X_k = X_1 + X_2'$ и $Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$ называются параметрами короткого замыкания.

Для практических целей треугольник короткого замыкания строят для тока $I_1 = I_{ном}$ и выражают все его стороны в процентном отношении номинального напряжения $U_{ном}$. При этом можно не придавать им характера векторов и не ставить на них стрелок (рис. 2.42).

Таким образом,

$$OB = u_{к,а} = \frac{I_{ном} R_k}{U_{ном}} 100; \quad (2.40)$$

$$BA = u_{к,р} = \frac{I_{ном} X_k}{U_{ном}} 100 \quad (2.41)$$

и

$$OA = u_k = \frac{I_{ном} Z_k}{U_{ном}} 100 = \frac{U_{к,ном}}{U_{ном}} 100. \quad (2.42)$$

Величины $u_{к,а}$ и $u_{к,р}$ называют составляющими напряжения короткого замыкания, а треугольник OBA , представленный на рис. 2.42, — основным треугольником короткого замыкания.

Поскольку при коротком замыкании основной поток мал, то потерями в стали сердечника можно пренебречь и считать, что мощность короткого замыкания P_k тратится только на покрытие потерь в меди обмоток $P_{м1}$ и $P_{м2}$, т.е.

$$P_k = P_{м1} + P_{м2}. \quad (2.43)$$

Потери в меди состоят из основных потерь $P_{м0}$, определяемых сопротивлениями обмоток $R_{м1}$ и $R_{м2}$ и добавочных потерь, обусловленных неравномерным распределением потоков рассеяния по сечению витка и его длине.

Основные потери в меди обмоток составляют главную часть потерь в меди и равны

$$P_{m0} = I_1^2 R_{10} + I_2^2 R_{20}. \quad (2.44)$$

Обычно добавочные потери включаются в основные путем некоторого увеличения значений сопротивлений R_{10} и R_{20} .

Таким образом,

$$P_k = P_{m1} + P_{m2} = I_1^2 R_{10} k_{R1} + I_2^2 R_{20} k_{R2} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = I_1^2 R_k, \quad (2.45)$$

где k_{R1} и k_{R2} — коэффициенты увеличения сопротивления вследствие добавочных потерь в меди для первичной и вторичной обмоток. Они зависят от типа обмоток — концентрические или чередующиеся, от формы проводника — круглый или прямоугольный, от устройства обмотки и т. д. Обычно значения коэффициентов увеличения сопротивления не превышают значения 1,05—1,15.

Мощность короткого замыкания, так же как и мощность холостого хода, имеет важное эксплуатационное значение. О величине мощности короткого замыкания можно судить по отношению

$$\frac{P_{k,ном}}{P_{ном}} 100, \text{ где } P_{k,ном} \text{ — мощность короткого замыкания при } I_1 = I_{н1}.$$

Соответствующие цифры для трех- и однофазных двухобмоточных трансформаторов приведены ниже:

$P_{к,ном}$, кВА5 ...20	30 ... 240	320 ... 5 600	7 500 ... 40 500
$\frac{P_{к,ном}}{P_{ном}} 100$, %3,7 ... 3,0	3 ... 2	2 ... 1	1,0 ... 0,50

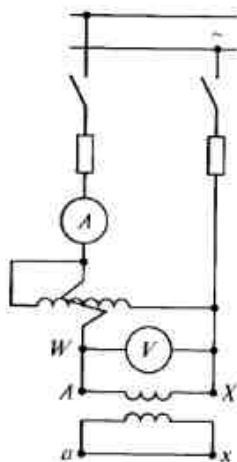


Рис. 2.43. Схема опыта короткого замыкания

Для стандартных трансформаторов соотношение значения мощности холостого хода и короткого замыкания имеет вид

$$P_0 : P_{k,ном} = 1 : (2,5/4).$$

Для определения параметров короткого замыкания производят опыт короткого замыкания однофазного трансформатора по схеме, приведенной на рис. 2.43. Пусть U_k — напряжение короткого замыкания, I_1 — первичный ток и P_k — мощность короткого замыкания, тогда

$$Z_k = \frac{U_k}{I_1}; \quad (2.46)$$

$$R_k = \frac{P_k}{I_1^2} \quad (2.47)$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}. \quad (2.48)$$

Зная параметры короткого замыкания, можно определить напряжение u_k и его составляющие $u_{k,a}$ и $u_{k,p}$. Действительно,

$$u_k = \frac{I_{ном} Z_{ном}}{U_{ном}} 100; \quad (2.49)$$

$$u_{k,a} = \frac{I_{ном} R_{ном}}{U_{ном}} 100 = \frac{I_{ном}^2 R_k}{U_{ном} I_k} 100 = \frac{P_{k,ном}}{10 P_{ном}}; \quad (2.50)$$

$$u_{k,p} = \frac{I_{ном} X_k}{U_{ном}} 100 = \sqrt{u_k^2 - u_{k,a}^2}. \quad (2.51)$$

2.10. Работа трансформаторов под нагрузкой

В реальном трансформаторе при нагрузке помимо основного магнитного потока Φ , сцепленного со всеми обмотками трансформатора, имеются также потоки рассеяния Φ_{s1} и Φ_{s2} , которые сцеплены только с одной из обмоток. Потоки рассеяния не участвуют в передаче энергии: они создают в каждой из обмоток ЭДС самондукции $E_{s1} = 4,44 f w_1 \Phi_{s1m}$ и $E_{s2} = 4,44 f w_2 \Phi_{s2m}$. С учетом ЭДС самондукции и падений напряжения в активных сопротивлениях обмоток имеем следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{s1} &= \dot{I}_1 R_1; \\ \dot{E}_2 + \dot{E}_{s2} &= \dot{I}_2 R_2 + \dot{I}_2 Z_n; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + \left(- \frac{I_2 w_2}{w_1} \right), \end{aligned} \quad (2.52)$$

где Z_n — сопротивление нагрузки, подключенной к трансформатору.

Поскольку потоки рассеяния полностью или частично замыкаются по воздуху, они пропорциональны МДС соответствующих обмоток или соответствующим токам:

$$E_{s1} = I_1 X_1; \quad E_{s2} = I_2 X_2. \quad (2.53)$$

Величины X_1 и X_2 называют индуктивными сопротивлениями обмоток трансформатора, обусловленными потоками рассеяния. Поскольку векторы ЭДС \dot{E}_{s1} и \dot{E}_{s2} отстают от соответствующих потоков и токов на 90° , то

$$\dot{E}_{s1} = -j \dot{I}_1 X_1; \quad \dot{E}_{s2} = -j \dot{I}_2 X_2. \quad (2.54)$$

С учетом выражения (2.54) комплексные уравнения трансформатора принимают следующий вид:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 = \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1 = \dot{I}_1 Z_1; \quad (2.55)$$

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 R_2 + j\dot{I}_2 X_2 + \dot{I}_2 Z_n = \dot{I}_2 Z_2; \quad (2.56)$$

$$\dot{I}_1 + \frac{-\dot{I}_2 w_2}{w_1} = \dot{I}_0. \quad (2.57)$$

Замена ЭДС \dot{E}_{s1} и \dot{E}_{s2} падениями напряжений $-j\dot{I}_1 X_1$ и $-j\dot{I}_2 X_2$ показывает роль потоков рассеяния: они создают индуктивные падения напряжения в обмотках, не участвуя в передаче энергии из одной обмотки в другую.

На рис. 2.44 приведены векторные диаграммы трансформатора при активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузках. Векторную диаграмму первичной обмотки трансформатора строят в соответствии с уравнением

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1. \quad (2.58)$$

Построение диаграммы начинают с магнитного потока Φ_m , который создается током холостого хода \dot{I}_0 . Этот ток опережает вектор магнитного потока Φ_m на угол $\gamma = 5 \dots 10^\circ$. Вектор ЭДС \dot{E}_1 , как и \dot{E}_2 , отстает от потока Φ_m на угол 90° . Ток в первичной

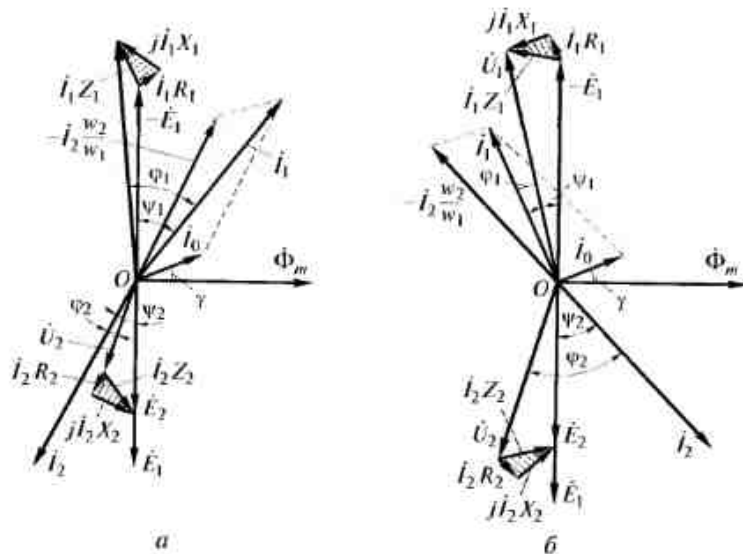


Рис. 2.44. Векторные диаграммы трансформатора при активно-индуктивной (а) и активно-емкостной (б) нагрузках

обмотке трансформатора $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \frac{-\dot{I}_2 w_2}{w_1}$, поэтому нужно показать и вектор тока \dot{I}_2 , сдвинутый на угол ψ_2 относительно вектора \dot{E}_1 (векторы \dot{E}_1 и \dot{E}_2 совпадают по направлению). Зная \dot{I}_2 , можно изобразить вектор $-\dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}$ и получить вектор \dot{I}_1 как сумму векторов \dot{I}_0 и $-\dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}$.

Найдя вектор тока \dot{I}_1 , можно определить значения векторов $\dot{I}_1 R_1$ и $j\dot{I}_1 X_1$ и построить искомый вектор напряжения \dot{U}_1 как сумму трех составляющих: векторов $-\dot{E}_1$ и падений напряжений в обмотках $\dot{I}_1 R_1$ и $j\dot{I}_1 X_1$.

Падение напряжения при нагрузке $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_n$ целесообразно заменить вторичным напряжением трансформатора, определяемым по формуле (2.56)

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - j\dot{I}_2 X_2. \quad (2.59)$$

Векторную диаграмму вторичной обмотки трансформатора строят согласно уравнению (2.59). Характер диаграммы определяется током нагрузки \dot{I}_2 , который принимается заданным по величине и фазе. Иными словами, задаваясь векторами вторичных тока \dot{I}_2 и напряжения \dot{U}_2 , можно построить вектор ЭДС

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 R_2 + j\dot{I}_2 X_2, \quad (2.60)$$

если известны параметры трансформатора. Вектор $\dot{I}_2 R_2$ параллелен вектору тока \dot{I}_2 , а вектор $j\dot{I}_2 X_2$ опережает вектор тока \dot{I}_2 на угол 90° . На диаграмме изображен и вектор магнитного потока Φ_m , который опережает вектор ЭДС \dot{E}_2 на 90° .

Рассмотрим схему замещения трансформатора под нагрузкой.

Решим систему уравнений (2.55)–(2.57) относительно первичного тока:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + Z_n(k^2 Z_{11} + k^2 Z_2)} = \frac{\dot{U}_1}{Z_{\text{вн}}}. \quad (2.61)$$

В соответствии с уравнением (2.61) трансформатор можно заменить электрической схемой, по которой можно определить токи I_1 и I_2 , мощность P_1 , забираемую из сети, мощность потерь ΔP и т.п. Такую электрическую схему называют схемой замещения трансформатора под нагрузкой (рис. 2.45). Эквивалентное сопротивление этой схемы равно

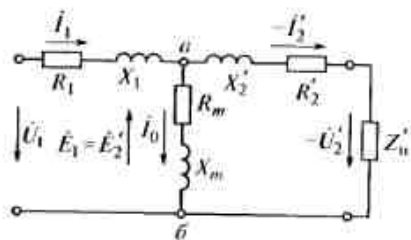


Рис. 2.45. Схема замещения трансформатора под нагрузкой

$$Z_{\text{экв}} = \frac{Z_1 + Z_m(Z'_n + Z'_2)}{Z_m + (Z'_n + Z'_2)} \quad (2.62)$$

Схема замещения трансформатора представляет собой сочетание двух схем замещения — первичной и вторичной обмоток, которые соединены между собой в точках *a* и *b* (см. рис. 2.45).

В цепь первичной обмотки включены сопротивления R_1 и X_1 , а в цепь вторичной обмотки — сопротивления R'_2 и X'_2 . Участок схемы замещения между точками *a* и *b*, по которому проходит ток I_0 , называют намагничивающим контуром. На вход схемы замещения подают напряжение U_1 , к выходу ее подключают переменное сопротивление нагрузки Z'_n , к которому приложено напряжение $-U'_2$.

Сопротивления Z'_2 (и его составляющие $R'_2 = R_2 k^2$ и $X'_2 = X_2 k^2$), а также Z'_n называют соответственно сопротивлениями вторичной обмотки и нагрузки, приведенными к первичной обмотке. Аналогично приведенными называют значения ЭДС и тока:

$$E'_2 = kE_2 = E_1; \quad I'_2 = \frac{I_2}{k}.$$

Полная мощность приведенного контура вторичной обмотки в схеме замещения равна мощности вторичной обмотки реального

трансформатора: $I'_2 E'_2 = \frac{I_2}{k} E_2 k = I_2 E_2$, а мощность электрических потерь в приведенном первичном контуре этой схемы равна мощности потерь во вторичной обмотке реального трансформатора:

$$I'^2_2 R'_2 = \left(\frac{I_2}{k}\right)^2 R_2 k^2 = I^2_2 R_2.$$

Переход от реального трансформатора к имитирующей его электрической схеме замещения можно представить состоящим из следующих этапов (рис. 2.46):

- реальный трансформатор заменяют упрощенным трансформатором *T*, в цепь первичной обмотки которого включают сопротивления R_1 и X_1 , а в цепь вторичной обмотки — R_2 и X_2 (рис. 2.46, *a*);

- параметры вторичной обмотки приводят к параметрам первичной, в результате чего ЭДС обмоток оказываются равными: $E_1 = E'_2$;
- соединяют эквипотенциальные точки *a* и *a'*; *b* и *b'* (рис. 2.46, *b*);
- включают дополнительный намагничивающий контур, по которому проходит составляющая I_0 первичного тока.

Параметры схемы замещения можно считать постоянными только при небольших изменениях первичного напряжения, т. е. в пределах 10%. Это в первую очередь относится к намагничивающему контуру с сопротивлением $Z_m = R_m + jX_m$, параметры которого определяют ток I_0 . С повышением напряжения происходит насыщение стали магнитопровода, вследствие чего уменьшается величина X_m (намагничивающий ток возрастает).

Параметры схемы замещения для любого трансформатора можно определить по данным опытов холостого хода и короткого замыкания по следующим формулам:

$$\begin{aligned} Z_1 + Z_m &= \frac{U_0}{I_0}; & R_1 + R_m &= \frac{P_0}{I_0^2}; \\ X_1 + X_m &= \sqrt{(Z_1 + Z_m)^2 - (R_1 + R_m)^2}. \end{aligned} \quad (2.63)$$

Поскольку ток холостого хода мал по сравнению с номинальным током трансформатора, электрическими потерями $\Delta P_{\text{хх}} = I_0^2 R_1$ пренебрегают и считают, что вся мощность, потребляемая транс-

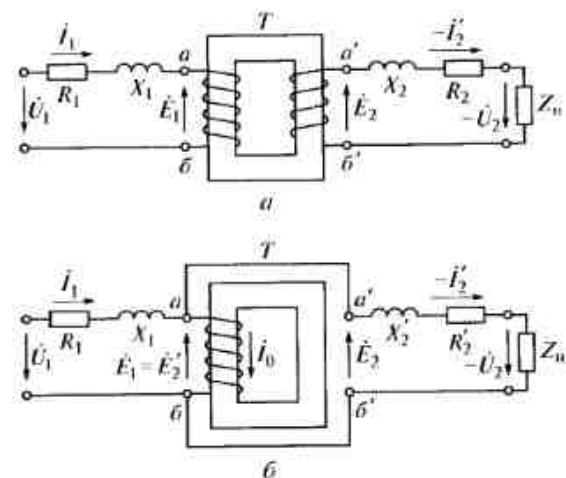


Рис. 2.46. Приведение вторичной обмотки к первичной:

a — упрощенный трансформатор; *b* — трансформатор с соединенными эквипотенциальными точками и дополнительным намагничивающим контуром

форматором P_0 , расходуется на компенсацию магнитных потерь в стали магнитопровода. Тогда

$$\Delta P_{\text{м}} = I_0^2 (R_1 + R_m) \approx I_0^2 R_m. \quad (2.64)$$

откуда $R_m = \frac{P_0}{I_0^2}$.

Аналогично считают, что $X_1 + X_m = X_m$, так как сопротивление X_m определяется основным магнитным потоком трансформатора Φ , а X_1 — потоком рассеяния $\Phi_{\text{с1}}$, который во много раз меньше Φ . Поэтому с большой степенью точности полагают, что

$$Z_m = \frac{U_0}{I_0}; \quad X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}. \quad (2.65)$$

Измерив напряжения U_0 и U_{20} первичной и вторичной обмоток, определяют коэффициент трансформации

$$k = \frac{U_0}{U_{20}}. \quad (2.66)$$

Из опыта короткого замыкания можно определить:

$$\begin{aligned} Z_k &= Z_1 + Z_2' = \frac{U_k}{I_{\text{ном}}}; \\ R_k &= R_1 + R_2' = \frac{P_k}{I_{\text{ном}}^2}; \\ X_k &= X_1 + X_2' = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}. \end{aligned} \quad (2.67)$$

Разделить Z_k на составляющие Z_1 и Z_2' довольно трудно. Обычно принимают схему замещения симметричной, полагая $Z_1 = Z_2' = 0,5Z_k$. Это допущение близко к действительности и не вносит ощутимых погрешностей в расчеты.

2.11. Внешние характеристики трансформаторов

Внешней характеристикой трансформатора называется зависимость $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = U_{1\text{н}} = \text{const}$, $R = R_0 = \text{const}$ и $\cos \varphi_2 = \text{const}$. Определим изменение вторичного напряжения трансформатора при нагрузке.

Ток холостого хода в силовых трансформаторах большой и средней мощности сравнительно мал. Поэтому при расчетах используют упрощенную схему замещения (рис. 2.47, а) без намагничивающего контура. В этой схеме активные сопротивления R_1 и R_2' первичной и вторичной обмоток соединены последовательно и обра-

зуют активное сопротивление короткого замыкания $R_k = R_1 + R_2'$. Индуктивные сопротивления X_1 и X_2' образуют индуктивное сопротивление короткого замыкания $X_k = X_1 + X_2'$.

Для упрощенной схемы замещения можно построить векторную диаграмму (рис. 2.47, б). В этой диаграмме вектор $I_1 R_k$ представляет собой результирующее активное падение напряжения в приведенном трансформаторе, вектор $jI_1 X_k$ — результирующее реактивное падение напряжения, а вектор $I_1 Z_k$ — результирующее полное падение напряжения.

Если известны значения u_k и его составляющие $u_{k,а}$, $u_{k,р}$, то полное падение напряжения в трансформаторе и его активную и реактивную составляющие находят по формулам

$$I_1 Z_k = \frac{\beta_{\text{ак}} U_{\text{ном}}}{100}; \quad I_1 R_k = \frac{\beta_{\text{ак,а}} U_{\text{ном}}}{100}; \quad I_1 X_k = \frac{\beta_{\text{ак,р}} U_{\text{ном}}}{100},$$

где $\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}} \approx \frac{I_1}{I_{1\text{ном}}}$ — коэффициент нагрузки.

Векторная диаграмма, представленная на рис. 2.47, б, позволяет определить изменение напряжения трансформатора в зависимости от нагрузки. Обычно его рассчитывают как отношение алгебраической разности значений вторичного напряжения при холостом ходе U_{20} и нагрузке U_2 к напряжению U_{20} при холостом ходе и выражают в процентах:

$$\Delta u = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} 100 = \frac{U_{20}' - U_2'}{U_{20}'} 100. \quad (2.68)$$

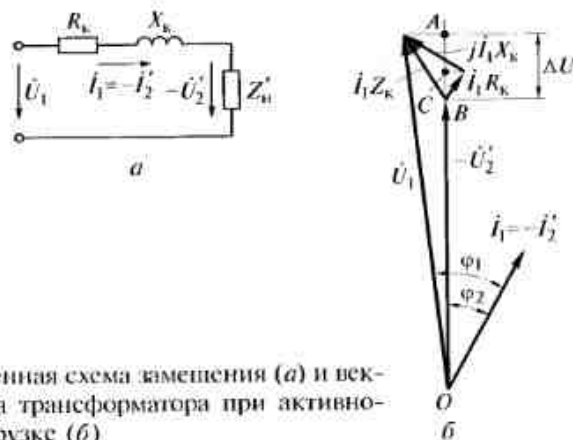


Рис. 2.47. Упрощенная схема замещения (а) и векторная диаграмма трансформатора при активно-индуктивной нагрузке (б)

Поскольку при холостом ходе отсутствуют падения напряжения в обмотках трансформатора, то $U'_{20} = U_1$, при номинальном значении $U_1 = U_{\text{ном}}$

$$\Delta u = \frac{U_{\text{ном}} - U'_2}{U_{\text{ном}}} 100. \quad (2.69)$$

Из диаграммы, приведенной на рис. 2.47, б, следует, что вследствие малости угла $\varphi_1 - \varphi_2$ за модуль вектора \dot{U}_1 можно принять его проекцию на направление вектора $-\dot{U}'_2$, т.е. отрезок OA . Тогда $\Delta U = U_1 - U'_2 = OA - OB = BA$.

Спроектировав векторы $I_1 R_k$ и $jI_1 X_k$ на направление вектора \dot{U}'_2 , получим

$$\Delta U = BA = BC + CA = I_1 R_k \cos \varphi_2 + I_1 X_k \sin \varphi_2.$$

Таким образом, относительное изменение напряжения, %,

$$\Delta u = \frac{I_1 R_k \cos \varphi_2 + I_1 X_k \sin \varphi_2}{U_{\text{ном}}} 100. \quad (2.70)$$

При номинальной нагрузке формула (2.70) принимает вид

$$\Delta u_{\text{ном}} = \frac{I_{\text{ном}} R_k \cos \varphi_2 + I_{\text{ном}} X_k \sin \varphi_2}{U_{\text{ном}}} 100,$$

или $\Delta u_{\text{ном}} = u_{k,r} \cos \varphi_2 + u_{k,x} \sin \varphi_2$.

Из формулы (2.70) следует, что изменение напряжения трансформатора пропорционально току нагрузки $I'_2 = I_1$ и зависит от угла φ_2 . Поэтому, используя понятие коэффициента нагрузки

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}} = \frac{I_1}{I_{1\text{ном}}},$$

получаем

$$\Delta u_{\text{ном}} = \beta \Delta u_{\text{ном}} = \beta (u_{k,r} \cos \varphi_2 + u_{k,x} \sin \varphi_2). \quad (2.71)$$

Более точная формула, используемая для силовых трансформаторов, имеет следующий вид:

$$\Delta u = \beta (u_{k,r} \cos \varphi_2 + u_{k,x} \sin \varphi_2) + \frac{\beta^2 (u_{k,r} \cos \varphi_2 - u_{k,x} \sin \varphi_2)^2}{200}. \quad (2.72)$$

Однако и формула (2.71) дает результат, точность которого вполне приемлема в большинстве практически встречающихся случаев.

Для построения внешних характеристик можно использовать формулу

$$U'_2 = U_{\text{ном}} \frac{1 - \Delta U}{100} =$$

$$= U_{\text{ном}} \left(\frac{1 - \beta (u_{k,r} \cos \varphi_2 + u_{k,x} \sin \varphi_2)}{100} - \frac{\beta^2 (u_{k,r} \cos \varphi_2 - u_{k,x} \sin \varphi_2)^2}{20000} \right). \quad (2.73)$$

В пределах изменения коэффициента нагрузки β от 0 до 1 внешние характеристики изменяются линейно (рис. 2.48, а).

Напряжение короткого замыкания u_k , его составляющие $u_{k,r}$ и $u_{k,x}$ зависят в определенной степени от номинальной мощности трансформатора. В трансформаторах средней и большой мощности реактивная составляющая напряжения короткого замыкания зна-

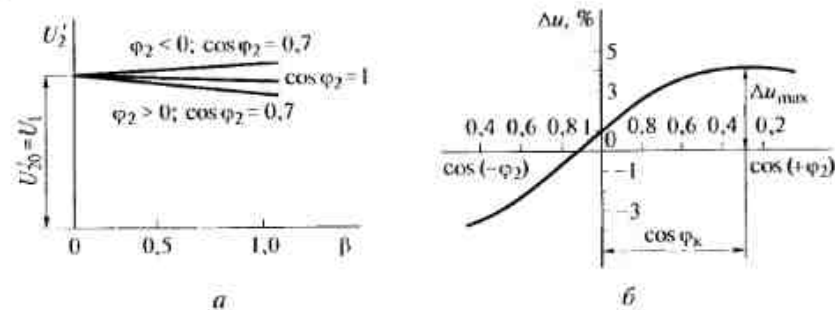


Рис. 2.48. Внешние характеристики трансформаторов (а) и график изменения Δu (б)

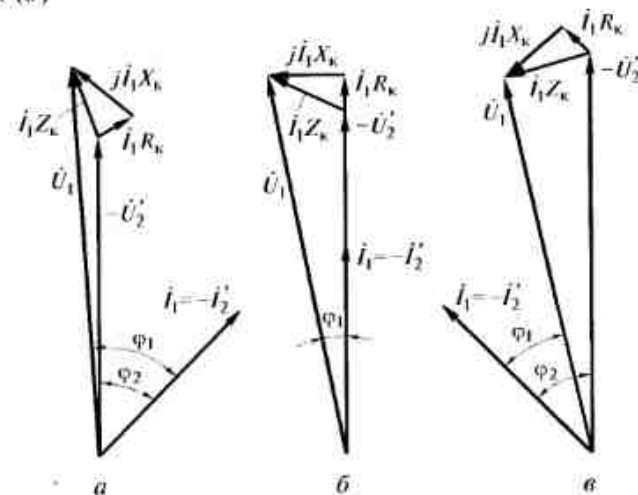


Рис. 2.49. Векторные диаграммы трансформатора, показывающие изменение вторичного напряжения от значений угла φ_2 :

а — $\varphi_2 > 0$; б — $\varphi_2 = 0$; в — $\varphi_2 < 0$

чительно больше, чем активная. Поэтому в таких трансформаторах реактивная нагрузка вызывает большее изменение напряжения U'_2 , чем активная, т.е. чем меньше $\cos \varphi_2$, тем ниже проходит внешняя характеристика и значительно изменяется напряжение U'_2 . При активно-индуктивной нагрузке всегда напряжение $U'_2 < U_1$; при активно-емкостной нагрузке и некоторых углах φ_2 оно может стать больше U_1 (в формуле (2.73) при $\varphi_2 < 0$ члены, содержащие $\sin \varphi_2$, становятся отрицательными). При заданном значении β относительное изменение напряжения Δu зависит от значения угла φ_2 . При активной нагрузке изменение напряжения Δu невелико: при активно-индуктивной нагрузке она возрастает и достигает максимального значения, когда $\varphi_2 = \varphi_1$; при активно-емкостной нагрузке эта величина может стать отрицательной (рис. 2.48, б).

Характер изменения вторичного напряжения в трансформаторах (при $X_k > R_k$) при различных значениях угла φ_2 показан на рис. 2.49. При $\varphi_2 > 0$ (рис. 2.49, а) увеличение нагрузки приводит к довольно быстрому возрастанию алгебраической разности $\Delta U = U_1 - U_2$. При $\varphi_2 = 0$ (рис. 2.49, б) величина ΔU возрастает с увеличением нагрузки в значительно меньшей степени. При $\varphi_2 < 0$ (рис. 2.49, в), т.е., когда ток I_2 опережает напряжение U'_2 (активно-емкостная нагрузка), величина ΔU может изменить свой знак.

Наличие индуктивных падений напряжения, вызываемых потоками рассеяния, ведет к нежелательному изменению напряжения трансформатора под нагрузкой. Чтобы уменьшить потоки рассеяния, первичные и вторичные обмотки выполняют на одних и тех же стержнях, по возможности приближая одну обмотку к другой. При концентрической обмотке на характер магнитного поля потоков рассеяния влияют токи обеих обмоток, и при режимах нагрузки, близких к номинальной, можно считать, что МДС первичной и вторичной обмоток равны по величине и находятся в противофазе. Поэтому сближение обмоток ведет к уменьшению потоков рассеяния.

Минимальное расстояние между обмотками ограничивается электрической прочностью изоляционного промежутка. Вследствие этого высоковольтные трансформаторы, в которых изоляционный промежуток больше, имеют относительно большие потоки рассеяния и напряжения короткого замыкания, чем низковольтные трансформаторы. При чередующей обмотке потоки рассеяния несколько больше, чем при концентрической.

2.12. Коэффициент полезного действия трансформатора

Коэффициентом полезного действия (КПД) трансформатора называют отношение отдаваемой мощности P_2 к мощности P_1 , поступающей в первичную обмотку:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1},$$

или

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1 + \Delta P}, \quad (2.74)$$

где ΔP — суммарные потери в трансформаторе.

Высокие значения КПД трансформаторов не позволяют определять его с достаточной степенью точности путем непосредственного измерения мощностей P_1 и P_2 , поэтому его вычисляют косвенным методом.

При передаче энергии из первичной обмотки во вторичную возникают потери в активных сопротивлениях первичной и вторичной обмоток ΔP_{m1} и ΔP_{m2} , а также потери в стали магнитопровода ΔP_c , поэтому

$$P_2 = P_1 - \Delta P_{m1} - \Delta P_{m2} - \Delta P_c \quad (2.75)$$

Формулу (2.74) можно представить в следующем виде:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + \Delta P_{m1} + \Delta P_{m2} + \Delta P_c} = 1 - \frac{\Delta P_{m1} + \Delta P_{m2} + \Delta P_c}{P_1 + \Delta P_{m1} + \Delta P_{m2} + \Delta P_c}. \quad (2.76)$$

Величину $P_m = P_1 - \Delta P_{m1} - \Delta P_c$, поступающую во вторичную обмотку, называют *внутренней электромагнитной мощностью трансформатора*.

Согласно стандарту потери мощности в трансформаторе определяют по данным опытов холостого хода и короткого замыкания. При указанных опытах трансформатор не отдает мощность. Следовательно, вся мощность, поступающая в первичную обмотку, расходуется на компенсацию имеющихся в нем потерь.

При опыте холостого хода ток I_0 невелик и электрическими потерями мощности в первичной обмотке можно пренебречь. Магнитный поток практически равен потоку при нагрузке, так как его величина определяется приложенным к трансформатору напряжением. Магнитные потери в стали пропорциональны квадрату значения магнитного потока. Следовательно, с достаточной точностью можно считать, что магнитные потери в стали магнитопровода равны мощности, потребляемой трансформатором при холостом ходе и номинальном первичном напряжении, т.е.

$$\Delta P_c = P_0. \quad (2.77)$$

Для определения суммарных электрических потерь полагают, что $I_2^2 = I_1$. При этом

$$\Delta P_m = \Delta P_{m1} + \Delta P_{m2} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \approx I_2^2 (R_1 + R_2) = I_2^2 R_k, \quad (2.78)$$

или

$$\Delta P_m = \beta^2 I_{2ном}^2 R_k = \beta^2 \Delta P_{m,ном}, \quad (2.79)$$

где $\Delta P_{m,ном}$ — суммарные электрические потери при номинальной нагрузке.

За расчетную температуру обмоток — условную температуру, к которой должны быть отнесены потери мощности ΔP_m , принимают: для масляных и сухих трансформаторов с изоляцией классов нагревостойкости *A, E, B* — +75 °С; для трансформаторов с изоляцией классов нагревостойкости *F, H* — +115 °С. Величину $\Delta P_{m,ном} = I_2^2 R_k = I_{2ном}^2 R_k$ можно с достаточной степенью точности принять равной мощности P_k , потребляемой трансформатором при опыте короткого замыкания, который проводится при номинальном токе нагрузки. При этом магнитные потери в стали ΔP_c весьма малы по сравнению с потерями ΔP_m в связи с сильным уменьшением напряжения U_1 , а следовательно, и магнитного потока трансформатора и ими можно пренебречь. Таким образом,

$$\Delta P_m = \beta^2 \Delta P_k. \quad (2.80)$$

Полные потери

$$\Delta P = P_0 + \beta^2 P_k. \quad (2.81)$$

Подставляя значения потерь в формулу (2.76) и учитывая, что $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$, находим

$$\eta = 1 - \frac{1 - (\beta^2 P_k + P_0)}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + \beta^2 P_k + P_0}, \quad (2.82)$$

где $S_{ном}$ — номинальная мощность.

Формула (2.82) рекомендуется стандартом для определения КПД трансформатора. Значения P_0 и P_k для силовых трансформаторов приведены в соответствующих стандартах и каталогах.

По формуле (2.82) можно построить зависимость КПД от нагрузки. При $\beta = 0$ полезная мощность и КПД равны нулю. С увеличением отдаваемой мощности КПД увеличивается, так как в энергетическом балансе уменьшается удельное значение магнитных потерь в стали, имеющих постоянное значение. При некотором значении $\beta_{опт}$ кривая КПД достигает максимума, после чего начинает уменьшаться с увеличением нагрузки. Причиной этого является сильное увеличение электрических потерь в обмотках, возрастающих пропорционально квадрату тока, т.е. пропорционально β^2 , в то время как полезная мощность P_2 возрастает только пропорционально β . Максимальное значение КПД в трансформаторах большой мощности достигает весьма больших значений — (0,98... 0,99). Оптимальный коэффициент нагрузки $\beta_{опт}$, при котором КПД

имеет максимальное значение, можно определить, взяв первую производную $\frac{d\eta}{d\beta}$ и приравняв ее к нулю. При этом

$$\beta_{опт}^2 P_k = P_0 \quad \text{или} \quad \Delta P_m = \Delta P_c. \quad (2.83)$$

Следовательно, КПД имеет максимальное значение при такой нагрузке, при которой электрические потери в обмотках равны магнитным потерям в стали. Это условие (равенство постоянных и переменных потерь) приближенно справедливо и для других типов электрических машин. Для серийных силовых трансформаторов

$$\beta_{опт} = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}} = \sqrt{0,2 \dots 0,25} = 0,45 \dots 0,5. \quad (2.84)$$

Эти значения $\beta_{опт}$ получены при проектировании трансформаторов на минимум приведенных затрат. Наиболее вероятная нагрузка трансформатора соответствует $\beta = 0,5 \dots 0,7$.

В трансформаторах максимум КПД выражен сравнительно слабо, т.е. он сохраняет высокое значение в довольно широком диапазоне изменения нагрузки ($0,4 < \beta < 1,5$). При уменьшении $\cos \varphi_2$ КПД снижается, поскольку возрастают токи I_2 и I_1 при заданной мощности P_2 .

В трансформаторах малой мощности КПД существенно меньше, чем в трансформаторах большой мощности. У трансформаторов, мощность которых менее 50 Вт, его значение составляет 0,6...0,8; при мощности трансформатора 100...500 Вт КПД равен 0,90...0,92.

2.13. Несимметричная нагрузка трехфазных трансформаторов

Согласно стандарту трехфазная система токов считается практически симметричной, если при разложении ее на вектора прямой и обратной последовательности оказывается, что величина векторов обратной последовательности I_2 не превышает 5 % величины векторов прямой последовательности I_1 .

Работа трансформатора при несимметричной нагрузке не представляет особого интереса, так как даже при очень неравномерной нагрузке вторичное напряжение продолжает оставаться симметричным. Короткие замыкания, которые являются предельными случаями несимметричной нагрузки, представляют значительный интерес с эксплуатационной точки зрения. Поэтому рассмотрим несимметричные короткие замыкания трансформатора.

Различают много режимов несимметричных коротких замыканий трансформаторов. Рассмотрим наиболее показательные, а

именно: однофазное короткое замыкание в системе Y/Y_0-0 ; то же, в системе Δ/Y_0-11 , двухфазное короткое замыкание в системе $Y/\Delta-11$.

При анализе этих режимов будем пользоваться методом симметричных составляющих. Любую несимметричную трехфазную систему, например систему токов I_A , I_B и I_C , можно разложить на три системы токов: прямой последовательности I_{A1} , I_{B1} и I_{C1} , обратной последовательности I_{A2} , I_{B2} и I_{C2} , нулевой последовательности I_{A0} , I_{B0} и I_{C0} . Токи каждой последовательности определяются для какой-нибудь фазы, например фазы A , по формулам:

$$I_{A1} = \frac{1}{3}(I_A + aI_B + a^2I_C); \quad (2.85)$$

$$I_{A2} = \frac{1}{3}(I_A + a^2I_B + aI_C); \quad (2.86)$$

$$I_{A0} = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C), \quad (2.87)$$

где a — так называемый оператор, показывающий, что данный вектор нужно повернуть на $\frac{2}{3}\pi$ по направлению вращения векторов,

$$a = 2^{j\frac{2}{3}\pi}. \quad (2.88)$$

Во всех случаях короткого замыкания будем пренебрегать током холостого хода и считать, что система первичных линейных напряжений симметрична и остается симметричной независимо от режима короткого замыкания и что вторичная обмотка приведена к первичной.

Рассмотрим случай однофазного короткого замыкания в системе Y/Y_0 . Предположим, что фаза $a-x$ замкнута накоротко, а фазы $b-y$ и $c-z$ разомкнуты. Соответственно этому $I_a = I_x$, $I_b = 0$ и $I_c = 0$. Чтобы упростить анализ, будем считать, что $R_x = 0$ и, следовательно, ток I_a отстаёт от E_a на 90° . Пользуясь формулами (2.85)–(2.87), разложим систему несимметричных вторичных токов на три симметричные: прямой последовательности $I_{a1} = I_{b1} = I_{c1}$, обратной $I_{a2} = I_{b2} = I_{c2}$ и нулевой $I_{a0} = I_{b0} = I_{c0}$.

По величине каждый из токов любой системы равен $\frac{1}{3}I_x$.

Системе токов прямой и обратной последовательности вторичной обмотки соответствуют такие же системы токов в первичной

обмотке. При этом первичные и вторичные токи системы находятся в противофазе, так как при коротком замыкании первичная и вторичная МДС действуют встречно. По величине первичные токи равны вторичным, поскольку вторичная обмотка согласно условию приведена к первичной. Основная разница между вторичной и первичной обмоткой состоит в том, что в первичной обмотке не может быть токов нулевой последовательности, поскольку первичная обмотка не имеет выведенной нулевой точки. Складывая геометрически токи прямой и обратной последовательности в фазах первичной обмотки получаем

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} = -\frac{2}{3}I_x; \quad I_B = I_{B1} + I_{B2} = \frac{1}{3}I_x; \quad I_C = I_{C1} + I_{C2} = \frac{1}{3}I_x.$$

Таким образом, однофазное короткое замыкание трансформатора можно представить как результат наложения трех режимов, а именно: двух симметричных режимов трехфазного короткого замыкания с прямым и обратным следованием фаз и третьего режима — однофазного тока только во вторичной обмотке.

Токи прямой и обратной последовательности образуют системы трехфазных токов с параметрами короткого замыкания Z_k , R_k , X_k . Токи нулевой последовательности протекают только по вторичной обмотке, поэтому они зависят только от сопротивлений нулевой последовательности Z_{k0} , R_{k0} , X_{k0} . Протекание токов нулевой последовательности I_{k0} и соответствующие им сопротивления Z_{k0} , R_{k0} , X_{k0} можно представить так, что все три фазные вторичные обмотки трансформатора соединяются последовательно и подключаются к источнику однофазного тока номинальной частоты.

Проходя по обмоткам, ток I_{k0} создает однофазный поток Φ_0 , величина и действие которого зависят от устройства магнитной системы трансформатора. Рассмотрим групповой трансформатор. В нем поток Φ_0 замыкается по сердечнику каждого из трансформаторов, образующих группу, и налагается на основной поток.

Чтобы показать, как действует однофазный поток Φ_0 в отношении основных потоков, рассмотрим диаграмму, приведенную на рис. 2.50, a , где \dot{E}_a , \dot{E}_b и \dot{E}_c — трехлучевая звезда вторичных ЭДС; $\dot{\Phi}_A$, $\dot{\Phi}_B$ и $\dot{\Phi}_C$ — трехлучевая звезда потоков в сердечниках A , B , C . Каждый вектор звезды потоков опережает соответствующий вектор звезды ЭДС на 90° . Вектор тока \dot{I}_c , а стало быть, и векторы тока \dot{I}_{k0} и потока $\dot{\Phi}_0$ отстают от вектора ЭДС \dot{E}_a на 90° . На диаграмме видно, что поток $\dot{\Phi}_0$ направлен навстречу основному потоку $\dot{\Phi}_A$ короткозамкнутой фазы $a-x$, т.е. стремится размагнитить эту фазу. Однако, складываясь геометрически с потоками $\dot{\Phi}_B$ и $\dot{\Phi}_C$, поток $\dot{\Phi}_0$ образует результирующие потоки $\dot{\Phi}'_B$ и

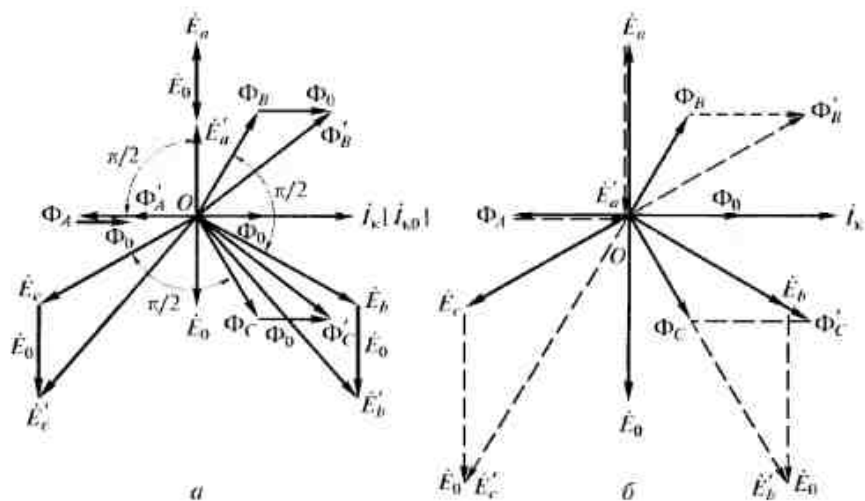


Рис. 2.50. Диаграмма ЭДС при однофазном коротком замыкании Y/Y_0-0 : *a* — при насыщенной стали; *б* — при ненасыщенной стали

Φ'_c , стремясь намагнитить эти фазы. При этом сталь сердечников *B* и *C* сильно насыщается, так что, говоря о сложении, следует иметь в виду сложение МДС, а не потоков. Если бы сталь не насыщалась и если пренебречь падениями напряжения, создаваемыми в короткозамкнутой фазе токами прямой и обратной последовательности, то в пределе поток Φ_0 был бы равен по величине потоку Φ_A (рис. 2.50, *б*) и фаза *A* была бы целиком размагничена. Потоки двух других фаз увеличились бы до значений $\Phi'_B = \Phi_B \sqrt{3}$ и $\Phi'_C = \Phi_C \sqrt{3}$. В действительности вследствие указанных двух причин фаза *A* размагничивается, а фазы *B* и *C* намагничиваются в меньшей степени, чем это показано на рис. 2.50, *б*.

То, что происходит с потоками, происходит и с фазными ЭДС. Можно представить, что поток Φ_0 создает в первичной и вторичной обмотках каждой фазы ЭДС E_0 ; сложив ее с основной ЭДС, получим новую систему фазных ЭДС E'_a , E'_b и E'_c для вторичной обмотки (см. рис. 2.50, *a*) и такую же систему ЭДС для первичной обмотки. В пределе $E_a = E'_a = 0$, а в каждой из двух других фаз ЭДС возрастает в $\sqrt{3}$ раз.

Можно считать, что напряжение питающей трансформатор сети не зависит от режима его работы, т. е. положение точек *A*, *B* и *C* в треугольнике напряжений зафиксированы. В этом случае размагничивающее действие потока Φ_0 в отношении фазы *a* — *A* и намагничивающее действие его в отношении фаз *b* — *B* и *c* — *C* сводится к перемещению точки *O*, общей всем трем фазам, в направлении точки *A*. Поскольку в групповом трансформаторе поток Φ_0 замы-

кается по сердечнику, то достаточно тока I_{k0} и, стало быть, небольшого тока короткого замыкания I_k , чтобы создать относительно большой поток Φ_0 и, сильно сдвинув нулевую точку из ее нормального положения, значительно исказить фазные напряжения.

Если исходить из предельного случая, то можно записать, что

$$E_A = E_a = I_{k0} Z_{k0}, \quad (2.89)$$

где $Z_{k0} = R_{k0} + jX_{k0}$ — полное сопротивление нулевой последовательности. При насыщенной стали сопротивление X_{k0} значительно больше, чем R_{k0} , но по мере насыщения стали незамкнутых накоротко фаз оно быстро уменьшается. Перемещение нулевой точки и связанное с этим резкое искажение фазных напряжений представляет реальную опасность для приемников, включенных между нулевым проводом и одной из фаз. Поэтому соединение по схеме Y/Y_0-0 в групповом трансформаторе никогда не применяется.

В трехстержневом трансформаторе сущность явления остается та же, но разница состоит в том, что магнитные цепи его фаз представляют собой связанную систему. Поэтому однофазный поток Φ_0 замыкается не по стали сердечника, а от ярма к ярму через воздух. При этом сопротивление Z_{k0} значительно меньше, чем в групповом трансформаторе и, кроме того, его можно считать постоянным. Соответственно этому ток I_k при однофазном коротком замыкании трехстержневого трансформатора значительно больше, чем в групповом трансформаторе. Искажение фазных напряжений по величине в данном случае меньше, однако выступающий из сердечника однофазный поток может использовать все близлежащие металлические части, в частности кожух, со всеми вытекающими отсюда последствиями. На этом основании соединение Y/Y_0-0 используют в трехстержневых трансформаторах только относительно малой мощности — не свыше 1 800 кВ·А.

Рассмотрим случай двухфазного короткого замыкания в системе $Y/\Delta-11$. К нему можно перейти от однофазного короткого замыкания, если параллельно с короткозамкнутой фазой включить последовательно соединенные две другие фазные обмотки. Чтобы такой переход носил постепенный характер, можно разомкнуть в какой-нибудь точке цепь и ввести туда реостат, сопротивление которого может изменяться от бесконечности до нуля. Очевидно, что при бесконечно большом сопротивлении реостата схема представляет собой схему однофазного короткого замыка-

ния с тем же распределением токов ($I_A = -\frac{2}{3} I_k$ и $I_B = I_C = \frac{1}{3} I_k$). Если начать уменьшать сопротивление реостата, то ток I_k будет разветвляться между обмоткой первой фазы и последовательно

соединенными обмотками двух других фаз. Ток в первой обмотке начинает уменьшаться, а в двух других постепенно увеличиваться. Вследствие этого неравенство первичной и вторичной МДС в каждой фазе начнет сглаживаться и однофазный поток Φ_0 будет постепенно уменьшаться. Все происходит так, как если бы ток нулевой последовательности, текущий только по вторичной обмотке, постепенно исчезал.

В пределе при полностью выведенном реостате ток нулевой последовательности $I_{\Delta 0}$ и однофазный поток Φ_0 практически исчезнут. Следовательно, схема Y/Δ —II надежна в работе.

2.14. Параллельная работа трансформаторов

На понижающих трансформаторных подстанциях часто возникает потребность в дроблении установленной трансформаторной мощности. Вместо одного трансформатора, рассчитанного на максимальную нагрузку подстанции, устанавливают два или несколько трансформаторов, имеющих ту же суммарную мощность. Дробление мощности электрической машины или трансформатора всегда приводит к излишнему расходу материалов и увеличению суммарных потерь.

Однако следует иметь в виду, что нагрузка подстанции часто развивается постепенно, в течение ряда лет, и нет оснований сразу устанавливать на подстанции трансформатор, рассчитанный на максимальную проектную нагрузку подстанции. В таких случаях дробление мощности экономически оправдывается и целесообразно бывает последовательно устанавливать несколько трансформаторов по мере роста нагрузки подстанции. При этом лучше также решается проблема резервирования, так как в случае повреждения одного из трансформаторов остальные могут полностью или частично временно принять на себя его нагрузку.

При суточных или сезонных колебаниях нагрузки подстанции наличие на ней двух или нескольких параллельно работающих трансформаторов позволяет при длительных снижениях нагрузки отключать часть трансформаторов, уменьшая тем самым расход энергии на покрытие магнитных потерь трансформатора.

Основная проблема, возникающая при параллельной работе трансформаторов, связана с обеспечением равномерного распределения нагрузки между ними. При параллельном включении одинаковых по мощности и конструктивно подобных трансформаторов равномерное распределение нагрузок между ними достигается автоматически в силу симметрии всех параллельных цепей. Однако на практике часто приходится параллельно включать трансформаторы, разные в конструктивном отношении и имеющие неодинаковые номинальные мощности.

Для включения трансформаторов на параллельную работу необходимо, чтобы при холостом ходе в их обмотках не возникали уравнительные токи и чтобы нагрузка распределялась между трансформаторами в соответствии с их номинальной мощностью. Для этого требуется соблюдать ряд условий.

При неравенстве ЭДС E_{201} и E_{20II} двух параллельно работающих трансформаторов, возникает уравнительный ток. Этот ток вызывает циркуляцию мощности от одного трансформатора к другому, а следовательно, неравномерную нагрузку трансформаторов, сопровождающуюся увеличением потерь и нагрева.

Уравнительный ток можно определить по формуле

$$i_{ур} = \frac{\dot{E}_{201} - \dot{E}_{20II}}{Z_{кI} + Z_{кII}} \quad (2.90)$$

Из формулы (2.90) следует, что первым необходимым условием для включения трансформаторов на параллельную работу является равенство их вторичных ЭДС, т. е. вторичных напряжений холостого хода. При этом трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации. На практике допускается параллельная работа силовых трансформаторов, имеющих различие в коэффициентах трансформации не более 0,5%, а для трансформаторов с $k > 3$ — не более 1%. При таком различии в коэффициентах трансформации разность вторичных ЭДС $\Delta \dot{E}$ небольшая и уравнительный ток незначительный.

Вторым необходимым условием является совпадение по фазе ЭДС \dot{E}_{201} и \dot{E}_{20II} , с тем чтобы их векторная разность $\Delta \dot{E} = \dot{E}_{201} - \dot{E}_{20II}$ равнялась нулю. Для этого параллельно работающие трансформаторы должны быть одной группы соединений. При невыполнении этого условия между одноименными зажимами вторичных обмоток возникает разность ЭДС $\Delta \dot{E}$, вызывающая появление уравнительного тока. Так, например, если трансформаторы принадлежат даже к ближайшим группам (например, одиннадцатой и нулевой), сдвиг по фазе между их вторичными ЭДС составит 30° и в контуре параллельно соединенных вторичных обмоток возникает большая разность ЭДС:

$$|\Delta \dot{E}| = |\dot{E}_{201} - \dot{E}_{20II}| = 2E_{20} \sin 15^\circ = 0,52E_{20}.$$

При этом уравнительный ток будет в несколько раз больше номинального. Токи распределяются между трансформаторами обратно пропорционально сопротивлениям короткого замыкания:

$$I_I/I_{II}/I_{III} = (1/Z_{кI})/(1/Z_{кII})/(1/Z_{кIII}). \quad (2.91)$$

Уравнение (2.91) можно привести к следующему виду:

$$I_I/I_{II}/I_{III} = (I_{номI}/I_{номI}Z_{кI})/(I_{номII}/I_{номII}Z_{кII})/(I_{номIII}/I_{номIII}Z_{кIII}). \quad (2.92)$$

Умножим левую часть уравнения (2.92) на $U_2 \cos \varphi_2$, а правую — на $\frac{U_{ном}^2}{100}$ и получим

$$P_I/P_{II}/P_{III} = (S_{номI}/u_{кI})/(S_{номII}/u_{кII})/(S_{номIII}/u_{кIII}). \quad (2.93)$$

Следовательно, для того чтобы нагрузки распределялись между параллельно включенными трансформаторами пропорционально их номинальным мощностям, они должны иметь одинаковые напряжения короткого замыкания. Практически удовлетворительное распределение нагрузки получают в тех случаях, когда напряжения короткого замыкания параллельно работающих трансформаторов отклоняются от их среднего арифметического значения не более чем на $\pm 10\%$.

Если при параллельной работе напряжения u_k не равны, то перегружается трансформатор с меньшим значением u_k , т.е. с меньшим сопротивлением Z_k . В этом случае приходится уменьшать общую нагрузку всей группы параллельно работающих трансформаторов, т.е. установленная мощность трансформаторов недоиспользуется.

При неравенстве активных $u_{кa}$ и реактивных $u_{кp}$ составляющих напряжений короткого замыкания токи параллельно работающих трансформаторов сдвинуты по фазе на некоторый угол. При этом суммарный ток, отдаваемый нагрузке, равен векторной сумме токов всех трансформаторов, т.е. меньше их алгебраической суммы. Следовательно, и в этом случае номинальная мощность трансформаторов используется не полностью.

У трансформаторов различных мощностей составляющие $u_{кa}$ и $u_{кp}$ различны: у трансформаторов большей мощности $u_{кa}$ больше, а $u_{кp}$ меньше, чем у трансформаторов меньшей мощности. Поэтому не рекомендуется включение на параллельную работу трансформаторов с отношением номинальных мощностей больше трех.

2.15. Автотрансформатор

Автотрансформатором называется такой трансформатор, в котором часть обмотки принадлежит одновременно первичной и вторичной системам. Принципиальная схема включения однофазного автотрансформатора приведена на рис. 2.51. Рассмотрим работу понижающего автотрансформатора. Первичное напряжение $\dot{U}_1 = \dot{U}_{AX}$ подводится к зажимам первичной обмотки AX ; вторичной обмоткой служит часть первичной между зажимами a и X .

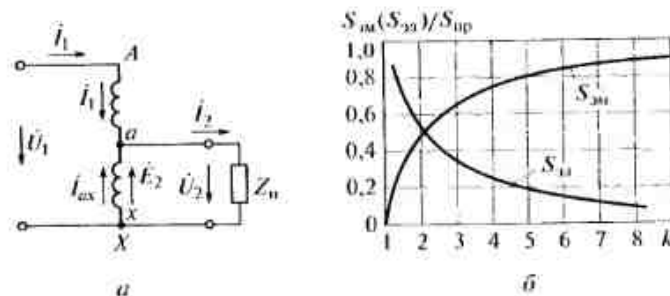


Рис. 2.51. Схема включения понижающего автотрансформатора (а) и зависимость значений мощностей S_m и S_{11} от значения коэффициента трансформации k (б)

Режим холостого хода автотрансформатора (когда $I_2 = 0$) ничем не отличается от соответствующего режима обычного трансформатора. Поскольку подводимое к трансформатору напряжение \dot{U}_{AX} равномерно распределяется между всеми витками первичной обмотки, то вторичное напряжение будет равно

$$U_{ax} = \frac{U_{AX} w_{ax}}{w_{AX}} = \frac{U_{AX} w_{AX}}{w_{ax}} = \frac{U_{AX}}{k_A}. \quad (2.94)$$

где k_A — коэффициент трансформации автотрансформатора.

Если подвести напряжение к зажимам aX , то получим повышающий автотрансформатор, в котором $\dot{U}_{AX} = k_A \dot{U}_{ax}$.

При коротком замыкании автотрансформатора из первичной сети течет ток I_1 , а в проводе, замыкающем зажимы ax , — ток I_2 .

Если бы обмотки AX и ax были отделены друг от друга, как в обычном трансформаторе, то, пренебрегая намагничивающим током, имели бы

$$\dot{I}_1 w_{AX} + \dot{I}_2 w_{ax} = 0, \quad \text{или} \quad \dot{I}_1 + \frac{1}{k_A} \dot{I}_2 = 0. \quad (2.95)$$

В автотрансформаторе ток I_1 протекает только по части обмотки, тока I_2 нет, по общей части обмотки течет ток, представляющий собою геометрическую сумму токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 . Следовательно,

$$\dot{I}_{ax} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = -\dot{I}_1(k_A - 1) = \dot{I}_2 \left(1 - \frac{1}{k_A}\right). \quad (2.96)$$

Сравним параметры короткого замыкания автотрансформатора и обычного трансформатора. Первые будем обозначать индексом A , а вторые — индексом I . При сравнении активных сопротивлений будем исходить из потерь в меди обычного трансформа-

тора и автотрансформатора. В обычном трансформаторе потери меди $I_1^2 R_{1r} + I_2^2 R_{2r}$. В автотрансформаторе ток I_1 течет только на участке с сопротивлением

$$R_{1X} = \frac{R_{1r} w_{Ax}}{w_{AX}} = \frac{R_{1r} (w_{AX} - w_{ax})}{w_{AX}} = R_{1r} \left(1 - \frac{1}{k_A} \right). \quad (2.97)$$

Следовательно,

$$P_{m/a} = I_1^2 R_{1r} = I_1^2 R_{1r} \left(1 - \frac{1}{k_A} \right). \quad (2.98)$$

Обмотка между зажимами ax играет роль вторичной обмотки. Но по ней течет ток I_{ax} , а не ток I_2 , поэтому площадь ее сечения изменяется пропорционально отношению $\frac{I_{ax}}{I_2}$, а активное сопротивление обратно пропорционально этому отношению. Следовательно,

$$P_{w/a} = I_{ax}^2 R_{w/a} = I_2^2 \left(1 - \frac{1}{k_A} \right)^2 R_{2r} \left(1 - \frac{1}{k_A} \right) = I_2^2 R_{2r} \left(1 - \frac{1}{k_A} \right). \quad (2.99)$$

Из сопоставления формул (2.98) и (2.99) следует, что автотрансформатор можно рассматривать как обычный трансформатор с активными сопротивлениями первичной и вторичной обмоток, уменьшенными каждая в $1 - \frac{1}{k_A}$ раз. Таким образом,

$$R_{w,1} = R_{1r} \left(1 - \frac{1}{k_A} \right) \quad (2.100)$$

и

$$P_{w,2} = P_{2r} \left(1 - \frac{1}{k_A} \right). \quad (2.101)$$

В таком же отношении уменьшается и вес меди обмоток автотрансформатора, т. е.

$$G_{w,2} = G_{2r} \left(1 - \frac{1}{k_A} \right). \quad (2.102)$$

Действительно, на участке La обмотка автотрансформатора имеет по сравнению с обычным трансформатором то же сечение, но в $1 - \frac{1}{k_A}$ раз меньшую длину, а на участке ax она имеет ту же

длину, что и вторичная обмотка трансформатора, но в $1 - \frac{1}{k_A}$ раз меньшее сечение.

В отношении индуктивного сопротивления автотрансформатора можно сделать тот же вывод, что и в отношении его активного сопротивления, т. е.

$$X_{k,1} = X_{1r} \left(1 - \frac{1}{k_A} \right). \quad (2.103)$$

Следовательно, напряжение короткого замыкания автотрансформатора составляет

$$u_{k,1} = u_{1r} \left(1 - \frac{1}{k_A} \right). \quad (2.104)$$

Обычно $k_A \leq 2$. Поэтому короткое замыкание автотрансформатора протекает в гораздо более тяжелых условиях, чем в обычном трансформаторе.

Так же как и в обычном трансформаторе, работу автотрансформатора под нагрузкой можно представить как результат взаимного наложения режимов холостого хода и короткого замыкания. В соответствии с этим можно построить для автотрансформатора такую же диаграмму, как и для обычного трансформатора с той разницей, что при прочих равных условиях треугольник ко-

роткого замыкания автотрансформатора будет в $1 - \frac{1}{k_A}$ раз меньше, чем для обычного трансформатора. Поэтому падение напряжения в автотрансформаторе меньше, чем в обычном трансформаторе, а отдача больше. Из формул (2.101) и (2.102) следует, что потери в меди тем меньше, а экономии на массе меди тем больше, чем ближе к единице коэффициент трансформации k_A .

В схеме понижающего автотрансформатора (рис. 2.51, а) первичное напряжение подводится к зажимам A и X ; вторичной обмоткой служит часть первичной обмотки между зажимами a и X , зажимы X и x совмещены. Поскольку в каждом витке обмотки индуцируется одинаковая ЭДС $E = 4,44 f \Phi_m$, то при холостом ходе напряжение на зажимах ax равно

$$U_2 = 4,44 f w_{ax} \Phi_m = U_1 \frac{w_{ax}}{w_{AX}} = \frac{U_1}{k_A}, \quad (2.105)$$

где w_{ax} и w_{AX} — число витков, включенных соответственно между зажимами a и x , A и X ; k_A — коэффициент трансформации.

В автотрансформаторе различают проходную мощность $S_{пр}$, которая передается из первичной цепи во вторичную и далее к нагрузке, и расчетную или типовую мощность $S_{расч}$, передаваем-

мую во вторичную цепь электромагнитным полем. Расчетная мощность $S_{расч}$ определяет габаритные размеры и массу автотрансформатора. Если пренебречь потерями, то проходящая мощность $S_{пр} = E_1 I_1 = E_2 I_2$, а расчетная $S_{расч} = E_2 I_{ax}$, где I_{ax} — результирующий ток на участке ax обмотки, к которому подключена нагрузка.

На участке ax через обмотку проходит ток, равный векторной сумме токов вторичной и первичной цепей $I_{ax} = I_1 + I_2$. Однако как следует из векторной диаграммы, токи I_1 и I_2 сдвинуты по фазе приблизительно на угол 180° . Поэтому, пренебрегая током холостого хода и переходя к модулям токов I_1 и I_2 , получаем

$$I_{ax} = I_2 - I_1. \quad (2.106)$$

Следовательно, проходящая мощность равна

$$S_{пр} = E_2 I_2 = E_2 (I_{ax} + I_1) = E_2 I_{ax} + E_2 I_1 = S_{вт} + S_{вт}. \quad (2.107)$$

где $S_{вт}$ — мощность, передаваемая во вторичную цепь электромагнитным полем, которая является расчетной мощностью автотрансформатора, $S_{вт} = E_2 I_{ax} = S_{расч}$; $S_{вт}$ — мощность, передаваемая в эту цепь, $S_{вт} = E_2 I_1$.

При указанных условиях, принимая $I_1 = I_2' = \frac{I_2}{k_A}$, из формулы (2.106) получаем

$$I_{ax} = I_2 \left(1 - \frac{1}{k_A} \right). \quad (2.108)$$

Откуда расчетная мощность автотрансформатора

$$S_{расч} = E_2 I_{ax} = E_2 I_2 \left(1 - \frac{1}{k_A} \right). \quad (2.109)$$

Отношение

$$k_{выг} = \frac{S_{расч}}{S_{пр}} = 1 - \frac{1}{k_A} \quad (2.110)$$

называют коэффициентом выгодности.

Мощность, передаваемая во вторичную цепь электрическим путем,

$$S_{вт} = E_2 I_1 = E_2 I_2 = \frac{E_2 I_2}{k_A} = \frac{S_{расч}}{k_A}. \quad (2.111)$$

В двухобмоточном трансформаторе $S_{вт} = 0$ и $S_{расч} = S_{пр}$.

Таким образом, расчетная мощность автотрансформатора меньше, чем мощность двухобмоточного трансформатора при той же проходящей мощности, передаваемой из первичной цепи во вто-

Схема соединения обмоток ВН и НН	Диаграмма векторов ЭДС ВН и НН

ричную, что позволяет выполнить автотрансформатор с меньшей массой и меньшими габаритными размерами. Отношение этих мощностей определяет коэффициент выгодности.

На рис. 2.51, б показаны зависимости мощностей $S_{вт}$ и $S_{вт}$ (в долях от проходящей мощности $S_{пр}$) от коэффициента трансформации k . Очевидно, чем ближе значение коэффициента трансформации k к единице, тем меньше расчетная мощность автотрансформатора и тем выгоднее его применять с точки зрения уменьшения массы, габаритных размеров и потерь мощности. Например, при $k_A = 1,1$ расчетная мощность автотрансформатора уменьшится в 10 раз, а при $k_A = 10$ расчетная мощность почти такая же, как у двухобмоточного трансформатора.

Обычно одно- и трехфазные автотрансформаторы применяют при необходимости сравнительно небольшого изменения напряжения: при $k \leq 2,5 \dots 3$. При больших k выгодность от их применения уменьшается. Силовые автотрансформаторы служат для снижения напряжения при пуске мощных асинхронных и синхронных электродвигателей. Автотрансформаторы малой мощности широко используют в устройствах связи и автоматики, радиоаппаратуре и лабораторных стендах. В последнее время автотрансформаторы большой мощности применяют для соединения высоковольтных сетей различных напряжений (110, 154, 220, 330, 500 и 750 кВ).

Существенным недостатком автотрансформаторов является то, что вторичная цепь у них электрически соединена с первичной. Поэтому обмотка НН и подключенные к ней потребители должны иметь ту же изоляцию относительно земли, что обмотка ВН и первичная цепь. Поэтому для обеспечения электробезопасности не допускается применять автотрансформаторы для питания цепей низкого напряжения от сети высокого напряжения.

Автотрансформаторы большой мощности редко применяют при $k > 2$ во избежание возникновения опасных перенапряжений во вторичной цепи при появлении атмосферных и коммутационных перенапряжений в первичной цепи (в линиях электропередачи).

Схемы и группы соединения обмоток одно- и трехфазных автотрансформаторов, выпускаемых в России, приведены в табл. 2.4.

2.16. Многообмоточные трансформаторы

В энергетических устройствах широко применяют трехобмоточные трансформаторы, а в устройствах радиотехники и автоматики — многообмоточные трансформаторы малой мощности. Наиболее распространенной схемой многообмоточного трансформатора является схема с одной первичной и несколькими вторичными обмотками.

На рис. 2.52 показана конструкция трехобмоточного трансформатора, в котором первичная обмотка 1 расположена между двумя вторичными обмотками 2 и 3. Такие трансформаторы применяют на электрических станциях и подстанциях для питания сетей с различными номинальными напряжениями. Очевидно, что в данном случае двум вторичным напряжениям U_2 и U_3 , получаемым от обмоток СН и НН, соответствуют два коэффициента трансформации:

$$k_{12} = \frac{w_{ВН}}{w_{СН}}; \quad k_{13} = \frac{w_{ВН}}{w_{НН}}. \quad (2.112)$$

Установившиеся процессы в обмотках трансформатора описываются следующей системой уравнений:

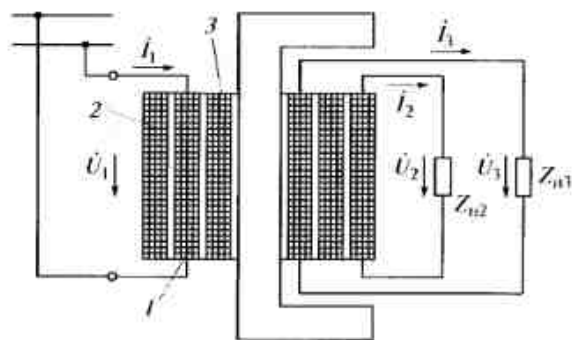


Рис. 2.52. Расположение обмоток в силовом трехобмоточном трансформаторе:

1 — первичная обмотка; 2, 3 — вторичные обмотки

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1; \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - j\dot{I}_2 X_2; \\ \dot{U}_3 &= \dot{E}_3 - \dot{I}_3 R_3 - j\dot{I}_3 X_3; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 - \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} - \dot{I}_3 \frac{w_3}{w_1}. \end{aligned} \quad (2.113)$$

Если привести параметры обмоток 2 и 3 к первичной 1 (см. рис. 2.52), то системе уравнений (2.113) будет соответствовать схема замещения, изображенная на рис. 2.53. От схемы замещения двухобмоточного трансформатора она отличается тем, что вторичная цепь имеет два луча. Очевидно, что при изменении нагрузки в одной из вторичных обмоток изменяются напряжения на обеих вторичных обмотках, т.е. существует взаимное влияние вторичных обмоток. Это объясняется тем, что изменяется падение напряжения на сопротивлении Z_1 схемы замещения, по которой проходит суммарный ток I_1 . Параметры схемы замещения можно определить расчетным либо экспериментальным путем. Параметры намагничивающего контура находятя посредством опытов холостого хода. Следует провести три опыта короткого замыкания: при замкнутой накоротко обмотке 2 и разомкнутой обмотке 3; при замкнутой накоротко обмотке 3 и разомкнутой обмотке 2; при замкнутых накоротко обмотках 2 и 3.

Напряжение короткого замыкания определяют при токах, соответствующих номинальной мощности наиболее мощной (первичной) обмотки. В соответствии с указанными опытами имеем

$$\begin{aligned} Z_{12} &= Z_1 + Z_2; \quad Z'_{13} = Z_1 + Z_3; \\ Z_k &= Z_1 + \frac{Z'_2 Z'_3}{Z'_2 + Z'_3}. \end{aligned} \quad (2.114)$$

Решив систему уравнений (2.114), получим

$$Z_1 = Z_{12} - Z'_2 = Z_{12} - \frac{(Z_{12} - Z_{13})a}{a-1}.$$

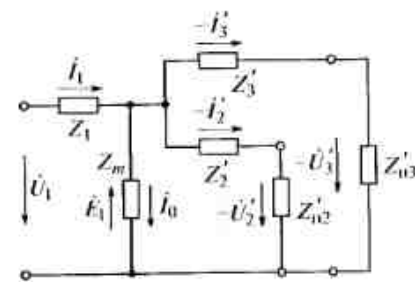


Рис. 2.53. Схема соединения силового трехобмоточного трансформатора

$$Z'_2 = \frac{(Z_{12} - Z_{13})a}{a-1}; \quad Z'_3 = \frac{Z_{12} - Z_{13}}{a-1}. \quad (2.115)$$

Следует отметить, что полученные параметры схемы замещения справедливы только при указанном на рис. 2.52 расположении обмоток. При изменении расположения обмоток меняются потоки рассеяния.

Согласно стандарту силовые трехобмоточные трансформаторы выполняют на одну номинальную мощность для всех трех обмоток. То обстоятельство, что сумма мощностей вторичных обмоток во всех случаях больше мощности первичной обмотки, на практике не приводит к перегрузке первичной обмотки, так как редко имеет место совпадение максимумов нагрузок обеих обмоток по времени. Кроме того, коэффициенты мощности $\cos \varphi_2$ и $\cos \varphi_3$ обычно различны, вследствие чего токи I'_2 и I'_3 сдвинуты по фазе и поэтому $I_1 = I'_2 + I'_3$.

Силовые трансформаторы малой мощности (для телевизоров, радиоприемников и т.п.) выполняют, как правило, многообмоточными: они имеют одну первичную обмотку и несколько вторичных, от которых питаются различные электрические цепи, не связанные между собой. Схема замещения многообмоточного трансформатора отличается от схемы двухобмоточного тем, что она имеет несколько лучей во вторичной цепи в соответствии с числом вторичных обмоток. В маломощных низковольтных трансформаторах ($U_{ном} \leq 220$ В; $S_{ном} \leq 500$ В·А) изоляция между обмотками имеет малую толщину, вследствие чего потоки рассеяния трансформаторов относительно малы. Поэтому в схеме замещения индуктивными сопротивлениями можно пренебречь и учитывать только активные сопротивления обмоток.

Активные сопротивления обмоток в многообмоточных трансформаторах измеряют обычными методами, а затем приводят к числу витков первичной обмотки, умножая на соответствующий коэффициент трансформации в квадрате. Проведение опытов короткого замыкания между парами обмоток для многообмоточного трансформатора нецелесообразно в связи с большим различием в мощностях первичной и вторичной обмоток.

2.17. Переходные процессы в трансформаторах и защита их от перенапряжений

При изменении одной или нескольких величин, определяющих работу трансформатора (напряжения, частоты, нагрузки и т.д.), происходит переход от одного установившегося состояния к другому. Обычно этот переход длится очень короткое время

и тем не менее он может сопровождаться весьма значительными и опасными для трансформатора эффектами, например: возникновением очень больших механических усилий между обмотками или их частями, крайне неравномерным распределением напряжения между отдельными частями обмотки или даже отдельными витками и т.п. Эти эффекты имеют особенно важное значение в современных мощных высоковольтных трансформаторах.

Различают две группы явлений: сверхтоки и перенапряжения. Сверхтоки возникают при включении трансформатора на сеть и при коротком замыкании. Перенапряжения обусловлены разными причинами, например: под действием атмосферных разрядов, при включении трансформатора на сеть и его выключении, при резких изменениях нагрузки и т.д.

Рассмотрим, как меняется ток включения холостого хода. Будем считать, что магнитная проницаемость стали $\mu = \text{const}$. Предположим, что трансформатор с разомкнутой вторичной обмоткой включается на сеть бесконечно большой мощности. Поскольку $\mu = \text{const}$, то полная индуктивность первичной обмотки L_1 тоже равна константе. В этом случае уравнение первичной ЭДС можно записать в следующем виде:

$$u_1 = i_0 R_1 + L_1 \frac{di_0}{dt}, \quad (2.116)$$

где u_1 — напряжение, подводимое к первичной обмотке в момент включения; i_0 — ток включения холостого хода.

Будем считать, что подводимое напряжение изменяется синусоидально и что остаточного магнетизма в трансформаторе нет.

Зададим момент включения углом α_0 (рис. 2.54), который будем называть фазой включения. Отсчет времени поведем от момента включения. Тогда

$$u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) = i_0 R_1 + L_1 \frac{di_0}{dt}. \quad (2.117)$$

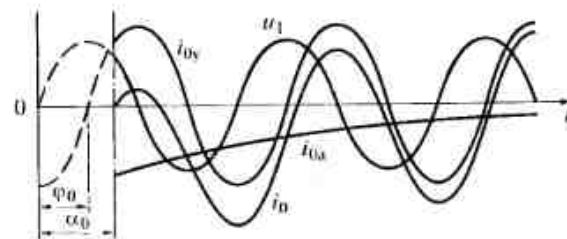


Рис. 2.54. Ток включения ненасыщенного трансформатора

Решая это уравнение, получаем

$$i_0 = i_{0y} + i_{0a} = \frac{U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi_0)}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} + \frac{U_{1m} \sin(\varphi_0 - \alpha_0) e^{-\frac{R_1 t}{L_1}}}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}}, \quad (2.118)$$

где i_0 — мгновенное значение тока включения холостого хода; i_{0y} и i_{0a} — мгновенные значения установившейся и аperiodической

составляющей тока включения холостого хода и $\varphi_0 = \text{arctg} \left(\frac{\omega L_1}{R_1} \right)$.

Обычно угол $\varphi_0 = 90^\circ$, поэтому формулу (2.118) можно переписать в следующем упрощенном виде:

$$i_0 = i_{0y} + i_{0a} = -\frac{U_{1m} \cos(\omega t + \alpha_0)}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} + \frac{U_{1m} \cos \alpha_0 e^{-\frac{R_1 t}{L_1}}}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}}, \quad (2.119)$$

Из формулы (2.119) можно сделать следующие выводы:

- ток включения холостого хода можно рассматривать как сумму двух токов: установившегося тока холостого хода i_{0y} и аperiodической составляющей i_{0a} ;

- первый ток представляет собою синусоидальную функцию времени с амплитудой $\frac{U_{1m}}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}}$, второй ток является постоянным по направлению, но затухающим по закону показательной функции;

- в момент включения ($t = 0$) токи i_{0y} и i_{0a} равны по величине, но имеют обратные знаки, т.е. результирующий ток равен нулю;

- при прочих равных условиях ток i_{0a} достигает наибольшей величины при $\alpha_0 = 0$, т.е. когда включение происходит в момент перехода напряжения через нуль. В этом случае значение аperiodической составляющей тока включения в начальный момент равно амплитуде установившегося тока. Если же включение происходит в момент, когда $u_1 = U_{1m}$, т.е. при $\alpha_0 = 90^\circ$, то аperiodическая составляющая тока включения равна нулю;

- скорость затухания аperiodической составляющей тока включения зависит от отношения $\frac{R_1}{L_1} = \frac{1}{T}$, где T — постоянная времени затухания. При $R_1 = 0$ $T = \infty$, т.е. переходный режим не может перейти в установившийся. Если, кроме того, $\alpha_0 = 0$, то ток включения долго колебался бы между нулем и двойной амплитудой установившегося тока холостого хода. После включения амплитуда тока включения наблюдается через половину периода (рис. 2.55).

Рис. 2.55. Ток включения ненасыщенного трансформатора при $R_1 = 0$

Все, что отмечалось относительно токов, может быть повторено и относительно создаваемых ими потоков Φ_{0y} и Φ_{0a} , так как согласно условию сталь трансформатора не насыщена и остаточного магнетизма нет.

При магнитной проницаемости стали $\mu \neq \text{const}$ индуктивность L изменяется в широких пределах за время каждого периода. Поэтому уравнение первичных ЭДС можно написать лишь в общей форме:

$$U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) = i_0 R_1 + \frac{d\Psi_0}{dt} = i_0 R_1 + w_1 d\Phi_0.$$

Рассмотрим предельный режим, когда $R_1 = 0$. В этом случае

$$U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) dt = w_1 d\Phi_0.$$

Интегрируя это уравнение, получаем

$$\Phi_0 = \frac{U_{1m} \cos(\omega t + \alpha_0)}{\omega w_1} + C = \Phi_{0m} \cos(\omega t + \alpha_0) + C,$$

где C — постоянная, определяется из условия, что в момент $t = 0$ поток $\Phi_0 = \Phi_{0c1}$. Следовательно,

$$C = \Phi_{0m} \cos \alpha_0 \pm \Phi_{0c1};$$

$$\Phi_0 = -\Phi_{0m} \cos(\omega t + \alpha_0) + \Phi_{0m} \cos \alpha_0 \pm \Phi_{0c1}. \quad (2.120)$$

Первое слагаемое в формуле (2.120) представляет собой поток при установившемся режиме, второе слагаемое — поток, соответствующий аperiodической составляющей тока включения. Самым неблагоприятным моментом включения является момент, когда $\alpha_0 = 0$, т.е. когда напряжение $u_1 = 0$. Если, кроме того, поток Φ_{0c1} имеет знак потока переходного режима, то амплитуда результирующего потока достигнет значения $2\Phi_{0m} + \Phi_{0c1}$.

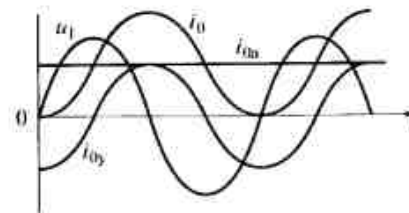


Рис. 2.55. Ток включения ненасыщенного трансформатора при $R_1 = 0$

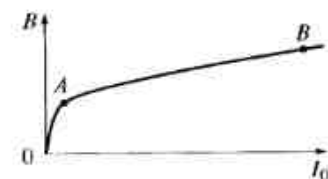


Рис. 2.56. Кривая намагничивания стали:

A — при нормальной индукции; B — при двойной индукции

Этот вывод совпадает с тем, который сделан для $\mu = \text{const}$. Следовательно, в отношении потоков картина не изменилась. Однако в отношении тока наблюдается другая картина, так как при насыщении стали он растет значительно быстрее потока. На рис. 2.56 изображена кривая намагничивания стали. Точка A соответствует нормальной индукции, точка B — двойной.

Ток включения холостого хода не представляет опасности непосредственно для трансформатора, но он может привести к его отключению от сети. Чтобы избежать этого, можно включить последовательно с трансформатором активное сопротивление R , выводимое по окончании операции включения. Сопротивление R подбирается так, чтобы возникающее в нем падение напряжения при номинальном токе составляло 2...5% от U_n .

Определим ток внезапного короткого замыкания. При коротком замыкании можно пренебречь намагничивающим током. В этом случае эквивалентная схема трансформатора представляет собой цепь с общим активным сопротивлением $R_k = R_1 + R_2'$ и общим индуктивным сопротивлением $X_k = X_1 + X_2'$. Если к этой цепи подвести синусоидальное напряжение в момент, фаза которого определяется углом α_k , то уравнение первичных ЭДС можно записать в обычном виде:

$$U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_k) = i_k R_k + L_k \frac{di_k}{dt} \quad (2.121)$$

Уравнение (2.121) отличается от уравнения (2.117) только тем, что в него входят параметры короткого замыкания вместо параметров холостого хода. Поэтому ток i_k определяется формулой, аналогичной формуле (2.118) или (2.119), если угол $\varphi_k = \arctg \frac{X_k}{R_k} = 90^\circ$:

$$i_k = i_{k,y} + i_{k,a} = -\frac{U_{1m} \cos(\omega t + \alpha_k)}{\sqrt{R_k^2 + (\omega L_k)^2}} + \frac{U_{1m} \cos \alpha_k}{\sqrt{R_k^2 + (\omega L_k)^2}} \frac{R_k t}{L_k} \quad (2.122)$$

Поскольку при коротком замыкании основное значение имеют потоки рассеяния, то можно считать, что $\mu = \text{const}$. Поэтому амплитуда сверхтока короткого замыкания $I_{k,\text{max}}$ теоретически (при $R_k = 0$) может достигнуть значения, равного двойной амплитуде

установившегося тока короткого замыкания, т.е. $\frac{I_{k,\text{max}}}{I_{k,y}} = k_k = 2$.

При коротком замыкании процесс затухает чрезвычайно быстро, в особенности в трансформаторах малой мощности с относитель-

но большими значениями отношения $\frac{R_k}{\omega L_k}$ (порядка $1/2 \dots 1/3$). В этом

случае процесс затухает практически за один период и отношение $k_k = 1,2 \dots 1,3$. В трансформаторах большой мощности, где

$\frac{R_k}{\omega L_k} = 1/10 \dots 1/5$, процесс затухает примерно за 5...7 периодов, и отношение $k_k = 1,5 \dots 1,7$.

Токи, возникающие в трансформаторе при коротком замыкании, могут вызвать механическое повреждение обмотки (а затем пробой изоляции) или резкое повышение ее температуры, что угрожает целостности изоляции.

Наибольший ток короткого замыкания $I_{k,\text{max}}$ называют *ударным током короткого замыкания*, а отношение $k_{уд} = \frac{I_{k,\text{max}}}{\sqrt{2}I_{k,y}}$ — *ударным*

коэффициентом. В мощных трансформаторах отношение $\frac{R_k}{X_k} = 1/10 \dots 1/5$, вследствие чего $k_{уд} = 1,7 \dots 1,8$. В трансформаторах средней мощности $k_{уд} = 1,2 \dots 1,3$. В трансформаторах малой мощности активное сопротивление больше индуктивного и практически переходным режимом можно пренебречь. В трансформаторах средней и большой мощности напряжение u_k обычно составляет 5...15% поэтому установившийся ток короткого замыкания в 6...20 раз больше номинального тока. Согласно стандарту силовые трансформаторы должны выдерживать без повреждения ток $I_{k,\text{уст}} = 25I_n$.

В автотрансформаторах сопротивление короткого замыкания Z_k и напряжение U_k меньше, чем в двухобмоточных трансформаторах той же номинальной мощности, вследствие чего установившийся и ударный токи короткого замыкания в автотрансформаторах обычно больше. Некоторые автотрансформаторы не могут выдерживать без повреждений ток короткого замыкания, и его следует ограничивать до безопасных значений путем включения реакторов.

В трансформаторах и автотрансформаторах малой мощности отношение $\frac{I_{k,\text{уст}}}{I_n}$ значительно меньше, чем в трансформаторах большой мощности.

При коротких замыканиях обмотки трансформаторов сильно нагреваются и на них действуют значительные электромагнитные силы. В трансформаторах при аварийных процессах короткого замыкания температура обмоток не должна превышать значений, указанных в табл. 2.5.

Для выполнения этого условия необходимо, чтобы длительность короткого замыкания, т.е. время срабатывания защиты было меньше времени t_k , требуемого для достижения опасного нагрева.

Таблица 2.5

Тип трансформатора	Значение максимальной температуры обмоток, °С	
	медных	алюминиевых
Масляный трансформатор с изоляцией класса нагревостойкости А	250	200
Сухой трансформатор с изоляцией класса нагревостойкости А	180	180
То же, с изоляцией класса нагревостойкости Е	250	200
То же, с изоляцией классов нагревостойкости В, F, H	350	200

При установлении времени t_k принимают, что в связи с кратковременностью работы трансформатора в режиме короткого замыкания процессе нагревания его обмоток происходит адиабатически, т.е. что выделяемая в них теплота не передается окружающей среде. Кроме того, пренебрегают свободной составляющей тока (она практически затухает через 0,03...0,6 с) и оценивают интенсивность нарастания температуры по установившемуся току короткого замыкания. При этих условиях время t_k (с), в течении которого медная обмотка достигает температуры 250 °С,

$$t_k = 2,5 \left(\frac{u_k}{\Delta_k} \right)^2, \quad (2.123)$$

где Δ_k — плотность тока при коротком замыкании.

Алюминиевая обмотка достигает температуры 200 °С за время

$$t_k = 0,56 \left(\frac{u_k}{\Delta_k} \right)^2. \quad (2.124)$$

Для масляных трансформаторов с медными и алюминиевыми обмотками длительность короткого замыкания не должна превышать 5 с. Обычно при внешних коротких замыканиях современная быстродействующая защита отключает трансформатор от сети значительно раньше, чем температура его обмоток достигает предельных значений. Однако при внутренних коротких замыканиях в трансформаторе ток в замкнутых накоротко витках возрастает в еще большей степени, чем при коротком замыкании всей обмотки. Это объясняется тем, что при уменьшении числа замкнутых витков ЭДС, действующая в короткозамкнутом контуре, снижается пропорционально числу витков в первой степени, а сопротивление контура (оно определяется индуктивностью замкнутых

витков) — пропорционально квадрату числа витков. Поэтому при внутренних коротких замыканиях проводники замкнутых витков частично расплавляются и в трансформаторе могут возникнуть значительные повреждения.

Электромагнитные силы образуются в трансформаторах в результате взаимодействия тока в обмотке с магнитным полем рассеяния. Поле рассеяния можно представить в виде суммы двух полей: продольного с индукцией B_d , магнитные линии которого направлены параллельно оси обмотки, и поперечного с индукцией B_q , линии которого расходятся радиально. Наличие поперечного поля обусловлено краевым эффектом, возникающим вследствие конечных значений высоты и ширины обмотки — чем выше обмотка, тем меньше поперечное поле. При взаимодействии этих полей с током обмотки образуются электромагнитные силы: радиальные F_r , стремящиеся сжать внутреннюю обмотку и растянуть внешнюю, и аксиальные F_a , стремящиеся увеличить несимметрию в расположении витков обмоток.

При отключении в одной из обмоток части витков для регулирования напряжения характер распределения магнитного поля рассеяния изменяется и возникает дополнительное поперечное поле. В результате появляются дополнительные аксиальные силы F'_a , стремящиеся увеличить имеющуюся несимметрию в расположении витков обмоток. При симметричном расположении отключаемых витков по высоте силы F'_a имеют наименьшее значение. При отключении части витков, расположенных у верхнего или нижнего краев обмотки, они сильно возрастают, вследствие чего возникают силы, которые могут разрушить ярмовую изоляцию трансформатора и обмотки.

В трансформаторах большой мощности механические усилия, действующие на обмотки, при коротких замыканиях весьма велики и поэтому необходимо принимать специальные меры, обеспечивающие механическую прочность обмоток. Поскольку электромагнитные силы пропорциональны квадрату тока, для маломощных трансформаторов опасность механического повреждения обмоток незначительна. Для этих трансформаторов более опасно чрезмерное нагревание обмоток.

Перенапряжения, возникающие в линии, совместно с которой работает трансформатор, и достигающее его зажимов, вызывается следующими причинами: коммутационными процессами, т.е. процессами включения трансформатора в линию и выключения из нее: аварийными режимами как, например, короткими замыканиями и повторными заземляющими дугами и явлениями атмосферного происхождения, как, например, газовым разрядом вблизи от линии. Во всех этих случаях электромагнитная волна, перемещаясь вдоль линии со скоростью, близкой к

скорости света, достигает зажимы трансформатора, частью проникает в трансформатор и начинает распространяться вдоль его обмотки.

Характер возникающих в трансформаторе перенапряжений зависит от формы электромагнитной волны. Различают апериодические волны (простые — рис. 2.57, *а* и сложные — рис. 2.57, *б*, из которых первая чаще всего наблюдается при атмосферных перенапряжениях) и периодические волны (рис. 2.57, *в*), наблюдаемые при коммутационных процессах.

Исследования показали, что перенапряжения, вызываемые процессами включения и выключения, превышают номинальное фазовое напряжение линии в 2—5 раз; перенапряжения аварийного порядка — в 7—8 раз и перенапряжения, вызываемые атмосферными причинами, — в 7—12 раз. Перенапряжения, пре-

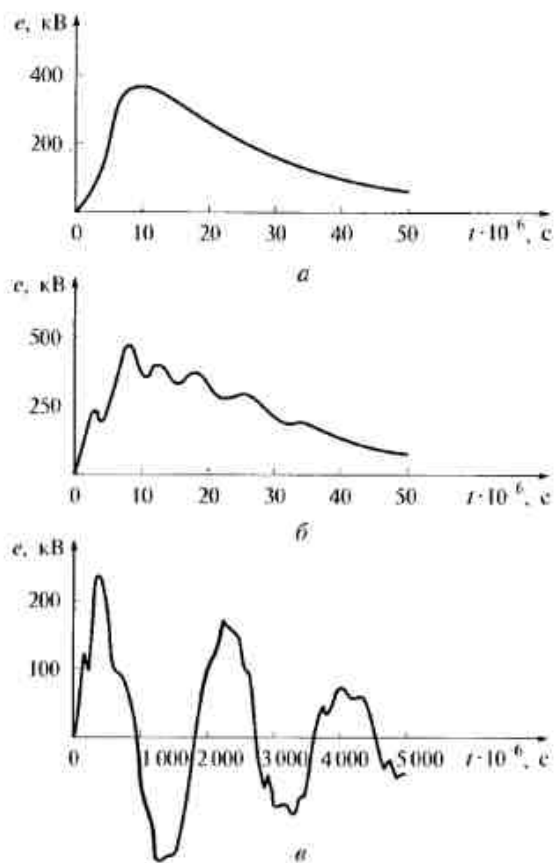


Рис. 2.57. Волны перенапряжений:
а — апериодические простые; *б* — сложные; *в* — периодические

вышающие рабочее напряжение линии в 2,5 раза, считаются безопасными; при превышении его в 3,5 раза являются уже опасными.

Достигающие зажимов трансформаторов перенапряжения всегда могут быть ограничены теми или иными мерами защиты. Гораздо опаснее внутренние перенапряжения, которые возникают при распространении электромагнитной волны вдоль обмотки и при которых напряжения между отдельными элементами обмотки или даже ее отдельными витками во много раз превышают нормальные напряжения между ними при установившемся режиме работы трансформатора. Опыт показывает, что чаще всего страдают витки, ближайшие к выходам трансформатора, но перенапряжения и соответственно пробой изоляции могут возникнуть в любой точке обмотки в зависимости, главным образом, от ее характеристик. Пробой изоляции влечет за собой аварию трансформатора.

Схема замещения при перенапряжениях. В полную схему замещения трансформатора кроме активных и индуктивных сопротивлений необходимо вводить емкостные сопротивления, обусловленные продольными емкостями C_d между отдельными элементами обмоток (витками и катушками) и поперечными емкостями C_q между этими элементами и заземленными частями (магнитопровод, бак). При рабочей частоте 50 Гц созданные емкостями сопротивления весьма велики и практически не оказывают влияния на работу трансформатора. Однако при больших частотах, характерных для волн перенапряжения, влияние этих емкостей возрастает, так как по мере увеличения частоты индуктивное сопротивление X_L увеличивается, а емкостное X_C уменьшается. Следовательно, все большая часть тока начинает проходить через емкости C_d и C_q .

На рис. 2.58 изображена упрощенная схема замещения входной обмотки трансформатора при воздействии волны перенапряжений, в которой не учитывается активное сопротивление, а индуктивности L включают в себя как собственную, так и взаимные индуктивности каждого элемента обмоток. При проходе волны напряжения к зажимам трансформатора напряжение на обмотке вследствие большой крутизны фронта волны быстро возрастает. Скорость этого процесса настолько велика, что ток сначала не проходит по виткам обмотки из-за большой их индуктивности, а проходит только по ее емкостной цепи. В этот момент обмотка действует как некоторая единая емкость $C_{вх} = \sqrt{C_{дпрс} C_{дпрс}}$, называемая входной. При этом значения продольной и поперечной со-

ставляющей входной емкости равны $C_{дпрс} = \frac{1}{\sum C_d}$ и $C_{дпрс} = \sum C_q$.

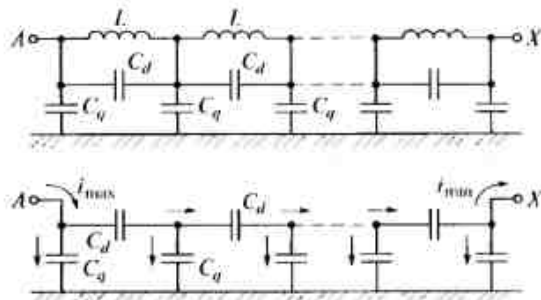


Рис. 2.58. Упрощенная схема замещения первичной обмотки трансформатора при воздействии волны перенапряжения

Распределение напряжения по обмотке в начале переходного процесса. При воздействии на трансформатор набегающей волны напряжения с крутым фронтом в схеме замещения входной обмотки возникает переходный процесс изменения тока и напряжения. В начальный момент в течение долей микросекунды происходит процесс заряда входной емкости. При этом при переходе волны напряжения из электрической линии (т. е. из цепи с меньшим волновым сопротивлением) в трансформатор (т. е. цепь с большим волновым сопротивлением) напряжение на его входной обмотке сначала уменьшается до нуля, а затем возрастает и достигает двукратного значения амплитуды волны. При начальном заряде входной емкости токи и электрические заряды распределяются по емкостной цепи от начала обмотки A к ее концу X неравномерно, так как по мере приближения к концу обмотки все большая часть тока ответвляется через поперечные емкости C_q в землю. Поэтому начальное распределение напряжения вдоль обмотки также неравномерно. Степень не-

равномерности зависит от коэффициента $\alpha = \sqrt{\frac{C_{пр1}}{C_{пр2}}}$, определяемого из решения системы дифференциальных уравнений, характеризующих распределение зарядов и напряжений вдоль емкостной цепи, имеющих вид:

$$u_x = A_1 e^{\alpha x} + A_2 e^{-\alpha x}, \quad (2.125)$$

где x — относительное расстояние рассматриваемой точки обмотки от ее конца (принимая длину обмотки $L = 1$); A_1 и A_2 — постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий.

При заземлении конца обмотки X уравнение (2.125) принимает следующий вид:

$$u_x = \frac{U_A(e^{\alpha x} - e^{-\alpha x})}{2 \operatorname{sh} \alpha} = \frac{U_A \operatorname{sh} \alpha x}{\operatorname{sh} \alpha}, \quad (2.126)$$

а при незаземленном конце

$$u_x = \frac{U_A(e^{\alpha x} - e^{-\alpha x})}{2 \operatorname{ch} \alpha} = \frac{U_A \operatorname{ch} \alpha x}{\operatorname{ch} \alpha}, \quad (2.127)$$

где U_A — амплитуда волны перенапряжения.

Полученные из уравнений (2.126) и (2.127) начальные распределения напряжений вдоль обмотки для различных значений α при заземленной и изолированной нейтрали изображены на рис. 2.59.

Обычно в трансформаторах $C_{пр1} > C_{пр2}$ и $\alpha = 5 \dots 15$, поэтому начальное распределение напряжения вдоль обмотки крайне неравномерно и почти одинаково для обмоток с заземленной и изолированной нейтралью. Кривые распределения напряжения показывают, что при перенапряжениях наибольшей опасности подвергается изоляция начальных витков и катушек, так как в начальные моменты на них воздействует максимальная часть напряжения.

Показанные на рис. 2.59 распределения напряжения соответствуют начальному моменту процесса, т. е. $t = 0$. После этого начинается переходный процесс, в конце которого распределение напряжения приобретает характер, соответствующий установившемуся режиму. Поскольку трансформатор представляет собой систему последовательно соединенных между собой индуктивностей и емкостей, переходный процесс носит колебательный характер, но протекает различно в зависимости от того, заземлена нейтраль или изолирована. Действительно, если по-прежнему имеем пря-

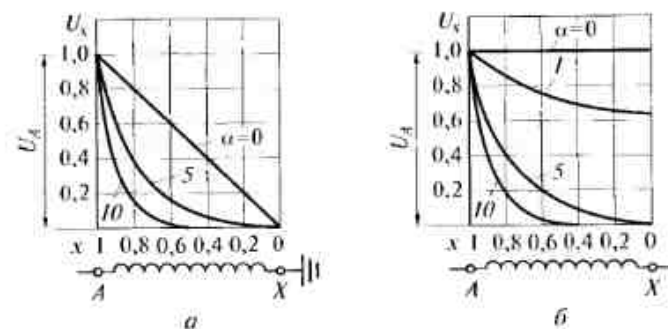


Рис. 2.59. Начальные распределения напряжений вдоль обмотки трансформатора при перенапряжениях для различных значений α : a — заземленная нейтраль; b — изолированная нейтраль

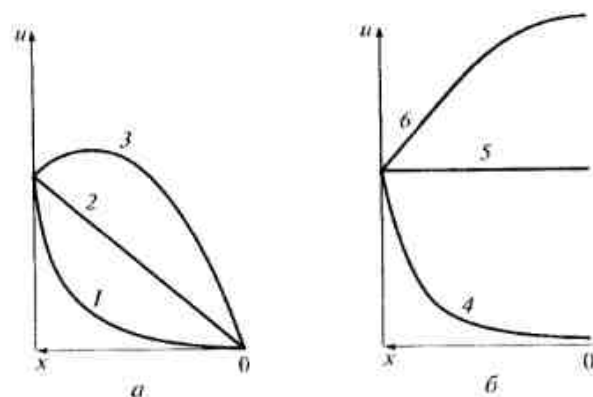


Рис. 2.60. Переходный процесс в трансформаторах:
a — с заземленной нейтралью; *б* — с изолированной нейтралью

могутольную волну бесконечной длины и нейтраль заземлена, то в конце переходного процесса (теоретически через время $t = \infty$) по обмотке трансформатора потечет установившийся ток. В этом случае распределение напряжения определяется наклонной прямой 2 на рис. 2.60, *a*. Колебания, постепенно затухая под действием активного сопротивления обмотки, происходят в области, ограниченной кривыми 1 и 3. Если нейтраль изолирована, то ток в конце переходного процесса не будет протекать по обмотке и напряжение любой точки ее станет равным напряжению ее линейного конца (кривая 5 на рис. 2.60, *б*). В этом случае колебания напряжения происходят в области, ограниченной кривыми 4 и 6, т.е. в гораздо более широкой области.

Если изобразить разности напряжений, определяемые кривыми 1—2 и 4—5 на рис. 2.60, то в первом случае получим полуволну, а во втором — четверть волны. Кроме того, могут получиться волны, кратные полуволне или четверти волны, но всегда так, чтобы при заземленной нейтрали напряжение волны на заземленном конце обмотки было равно нулю, а при изолированной нейтрали — максимуму. Следовательно, в первом случае кратность получающихся волн разностного напряжения определяется рядом

$$n = 1/2, 2/2, 3/2 \text{ и т. д.},$$

а во втором случае — рядом

$$n = 1/4, 3/4, 5/4 \text{ и т. д.}$$

Способы защиты трансформаторов от перенапряжения можно разделить на внешние и внутренние. Меры внешней защиты — придание большей диэлектрической прочности тем частям обмотки, которые чаще других и в наибольшей степени подвергаются

перенапряжениям, и в таком конструктивном оформлении трансформатора, при котором распределение напряжения во время переходного режима было достаточно равномерным.

Для предотвращения воздействия на трансформаторы волн перенапряжений с амплитудой, превышающей допустимую для данного класса изоляции, трансформаторные подстанции защищают заземленными тросами и разрядниками. Они обеспечивают снижение амплитуды падающей на трансформаторы волны перенапряжения.

В трансформаторах напряжением 35 кВ для защиты от атмосферных перенапряжений в начале и конце обмотки ВН усиливают изоляцию первой и второй катушек, а также увеличивают вентиляционные каналы между ними. Нейтраль обмоток с напряжением 35 кВ и выше заземляют непосредственно либо через сопротивление, которые при высокочастотных колебаниях не оказывают существенного влияния на характер переходного процесса.

Для выравнивания начального распределения напряжения и сближения его с конечным распределением, а также для снижения опасных резонансных электромагнитных колебаний под воздействием волн перенапряжения в трансформаторах напряжением 110 кВ и выше применяют емкостную защиту обмоток. Сущность такой защиты заключается в том, что в конструкцию обмотки включают добавочные емкости C_{11} и C_{22} (рис. 2.61, *a*), выполненные в виде электростатических экранов, которые шунтируют продольные емкости C_d . В этом случае при заземлении кон-

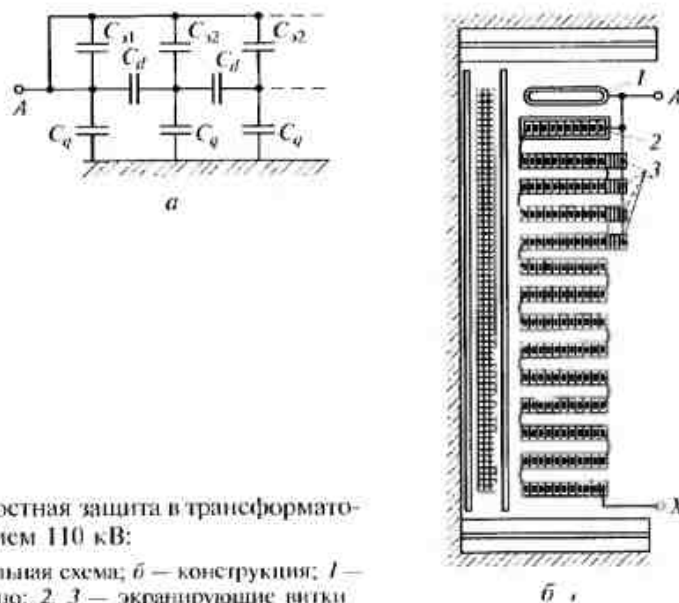


Рис. 2.61. Емкостная защита в трансформаторах напряжением 110 кВ:

a — принципиальная схема; *б* — конструкция; 1 — емкостное кольцо; 2, 3 — экранирующие витки

ца X обмотки ВН кривая начального распределения напряжения приближается к прямой конечного распределения.

Емкостная защита состоит из следующих элементов (рис. 2.61, б):

- емкостного кольца I , установленного у входной катушки. Оно выравнивает электрическое поле у начала обмотки и представлено на принципиальной схеме рис. 2.61, а в виде емкости C_{11} . Емкостное кольцо изготавливают из тонкой медной ленты шириной 20...30 мм, завернутой в кабельную бумагу и наматываемой в два слоя (бифилярно) на шайбу из электрокартона с закругленными краями;

- экранирующих витков 2 и 3 , выполненных в виде разомкнутых металлических колец, охватывающих несколько первых катушек обмотки и прикрепленных к ним. Они повышают электрические потенциалы у начальной и последующих катушек обмотки и изображены на принципиальной схеме рис. 2.61, а в виде емкостей C_{12} . Экранирующие витки имеют усиленную изоляцию и выполняются из того же провода, что и витки катушек. Для уменьшения емкостей C_{12} экранирующие витки катушек, более удаленных от начала, располагают на большем расстоянии от катушек обмотки, чем начальные витки. Все начала экранирующих витков и емкостное кольцо присоединяют к началу A обмотки, т.е. они имеют потенциал электрической линии. Трансформаторы с емкостной защитой называют нерезонирующими, так как у них практически устранена опасность возникновения значительных резонансных колебаний в обмотках при воздействии периодических затухающих волн перенапряжения.

В трансформаторах напряжением 110 кВ и выше наряду с емкостной защитой начальные и концевые катушки высоковольтных обмоток выполняют с усиленной изоляцией.

2.18. Трансформаторы специального назначения

Трансформаторы со ступенчатым регулированием напряжения.

При эксплуатации трансформаторов часто возникает необходимость регулирования вторичного напряжения. При этом различают два основных случая:

- стабилизация вторичного напряжения при незначительном (на 5...10%) изменении первичного напряжения;
- регулирование вторичного напряжения в широких пределах при неизменном первичном напряжении.

В обоих случаях вторичное напряжение регулируется путем изменения коэффициента трансформации. В первом случае при небольших изменениях первичного напряжения можно изменять число витков либо первичной, либо вторичной обмотки. Во вто-

ром случае, когда требуется регулировать вторичное напряжение при неизменном первичном, изменяют число витков вторичной обмотки.

Переключение ответвлений обмоток w_1 и w_2 может осуществляться при отключении трансформатора от первичной и вторичной сетей (переключение без возбуждения) или под нагрузкой (регулирование под нагрузкой).

Переключение ответвлений без возбуждения. Регулирование напряжения этим способом применяют в масляных и сухих силовых трансформаторах общепромышленного назначения, а также в трансформаторах, предназначенных для вентиляльных преобразователей. Напряжение регулируют на $\pm 5\%$ от U_n ступенями по 2,5%, т.е. трансформатор имеет пять ступеней регулирования напряжения. В трансформаторах сравнительно небольшой мощности используют три ступени регулирования напряжения (+5; 0; -5%). В силовых трансформаторах большой мощности обычно напряжение регулируют на стороне ВН, что позволяет упростить конструкцию переключателя ответвлений, так как токи в обмотке ВН меньше, чем в обмотке НН. Кроме того, число витков обмотки ВН больше, чем обмотки НН, вследствие чего изменение числа витков на 1,25...2,5% можно осуществлять с большей точностью. В трансформаторах, предназначенных для вентиляльных преобразователей, часто напряжение регулируют на стороне НН; при этом переключающую аппаратуру выполняют на большие токи, что сильно усложняет ее конструкцию.

При регулировании напряжения отключают часть витков только одной (первичной или вторичной) обмотки, что нарушает равномерность распределения МДС по высоте обмотки. Это приводит к искажению магнитного поля рассеяния, которое, взаимодействуя с током обмоток, создает электромагнитные силы, действующие на обмотку в осевом направлении. При аварийных режимах (короткое замыкание) эти силы могут достигать больших значений и вызывать разрушение обмотки. Поэтому стремятся равномерно распределить отключаемые витки обмотки по высоте или расположить их по возможности в середине высоты обмотки, симметрично относительно обоих ярм. В трехфазных трансформаторах сравнительно небольшой мощности, где электромагнитные силы при коротких замыканиях невелики, для упрощения конструкции переключателя ответвлений целесообразно выполнять ответвления вблизи нулевой точки обмотки, так как при этом уменьшается напряжение, на которое должна быть рассчитана изоляция переключателя. Если ответвления располагать в средней части обмотки (в мощных трансформаторах), то переключающую аппаратуру необходимо выполнять с усиленной изоляцией и с высокой степенью точности, так как несогласованность работы ее элементов при высоком напряжении может привести к серьезным авариям.

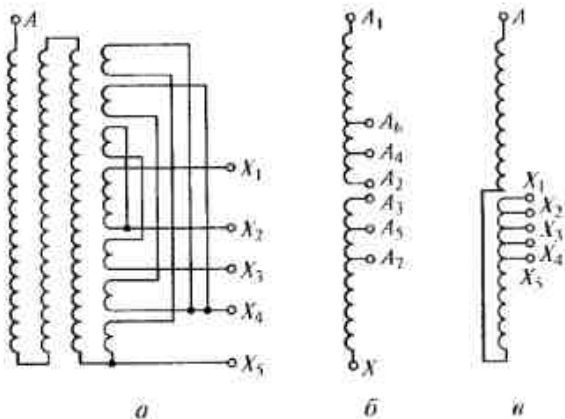


Рис. 2.62. Расположение регулировочных ответвлений в силовых трансформаторах:

a — в многослойных цилиндрических обмотках; *б* — в средней части обмоток (прямая схема); *в* — в средней части обмотки (оборотная схема)

В трансформаторах с многослойной цилиндрической обмоткой отключаемые витки обычно размещают в конце обмотки во внешнем ее слое и располагают симметрично по высоте относительно обоих ярм. При переходе с одного ответвления $X_1—X_5$ на другое (рис. 2.62, *a*) отключается равное число витков. В обмотках других конструкций ответвления $A_2—A_7$ располагают в средней части обмотки (рис. 2.62, *б*). При номинальном напряжении обмотки ВН до 35 кВ часто применяют обратную схему (рис. 2.62, *в*), которая позволяет расположить ответвления $X_1—X_5$ около нулевой точки и в то же время в середине обмотки (по высоте). При обратной схеме одна половина обмотки имеет правую, а другая — левую намотку. В масляных трансформаторах переключение ответвлений осуществляется переключателем, встроенным в трансформатор, рукоятка которого, выведена из бака. В сухих трансформаторах ответвления выводят на контактную панель и переключение производят путем перестановки контактной пластины на различные выходные шпильки. Контактный переключатель имеет систему неподвижных контактов, соединенных с ответвлениями обмотки, и систему подвижных контактов, замыкающихся с неподвижными и обеспечивающих требуемую схему соединения между собой обмоток отдельных фаз.

Переключение ответвлений под нагрузкой. Для удобства управления крупными электрическими сетями и системами большое значение имеет возможность регулирования напряжения трансформаторов без перерыва нагрузки. Промышленность выпускает трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой

для всех мощностей от 63 до 200 000 кВ·А с пределами регулирования $\pm(10...16)\%$.

При использовании этого способа регулирования необходимо: обеспечить переход с одного ответвления на другое без разрыва тока, для чего в некоторый момент времени должны быть включены два соседних ответвления; ограничить ток короткого замыкания в части обмотки трансформатора, расположенной между этими ответвлениями при одновременном их включении. Для этого применяют переключающие устройства с дистанционным управлением и с токоограничивающими реакторами и резисторами, а в трансформаторах, предназначенных для вентиляльных преобразователей, — устройства с вентильным переходом.

На рис. 2.63 приведена схема переключающего устройства с токоограничивающим реактором. Устройство состоит из реактора P , двух контакторов $K1$ и $K2$, предназначенных для разрыва тока, который проходит по двум параллельным ветвям реактора, и двух переключателей $\Pi1$ и $\Pi2$, осуществляющих переключения этих ветвей при отсутствии тока. Переключающее устройство действует следующим образом. В первом рабочем положении I, когда переключающее устройство подключено к ответвлению X_1 контакторы $K1$ и $K2$ замкнуты и ток проходит по параллельным ветвям реактора в разных направлениях, не намагничивая его. Поэтому индуктивное сопротивление реактора весьма мало. При переходе с ответвления X_1 на ответвление X_2 сначала отключается контактор $K1$, но цепь тока не прерывается, так как он продолжает проходить через контактор $K2$ (промежуточное положение II). Затем переключатель $\Pi2$ без тока переводится на ответвление X_2 , после чего вновь включается контактор $K1$ (промежуточное положение III). В этом положении через обе половины реактора проходит ток одного направления, его индуктивное сопротивление резко возрастает и он эффективно ограничивает ток I_k в замкнутом контуре, образованном частью обмотки трансформатора, которая расположена между ответвлениями X_1 и X_2 . После этого размыкается контактор $K2$, переключатель $\Pi1$ переводится без тока на ответ-

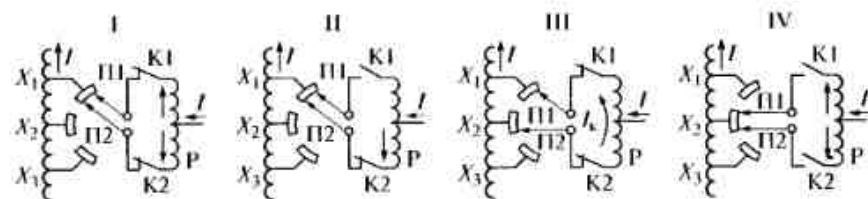


Рис. 2.63. Схемы переключающего устройства с токоограничивающим реактором:

I, II, III, IV — положения переключающих элементов; P — реактор; K — контактор; Π — переключатель

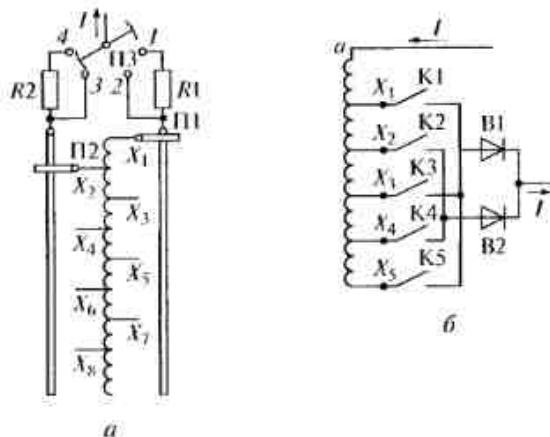


Рис. 2.64. Схемы переключающего устройства с токоограничивающими активными сопротивлениями (а) и вентиляльным переходом (б):

П — переключатель; К — контактор; В — вентиль

ление X_2 и снова замыкается контактор К2, т. е. на этом заканчивается переход во второе рабочее положение IV, при котором переключающее устройство подключено к ответвлению X_2 . Реактор и переключатели помещают внутри масляного бака трансформатора, а контакторы — в специальном баке, расположенном на боковой стенке основного бака. Находящееся в специальном баке масло, которое загрязняется при разрыве контакторами тока, с маслом основного бака не соединяется.

Переключающее устройство с токоограничивающими резисторами (рис. 2.64, а) оснащено тремя переключателями — П1, П2 и П3. При работе трансформатора на ответвлении X переключатели П2 и П3 занимают показанное на рис. 2.64 положение. Чтобы перейти на соседнее ответвление X_1 , сначала на это ответвление следует провести без тока переключатель П1. Затем быстродействующий переключатель П3 быстро перебрасывается по часовой стрелке в положение, при котором он замыкает контакты К1 и К2. Процесс размыкания контактов К3, К4 и замыкания контактов К1, К2 происходит таким образом, что цепь тока не прерывается, а в промежуточном положении, когда переключатель П3 замыкает одновременно контакты К1 и К4, ток в части обмотки трансформатора, расположенной между ответвлениями X_1 и X_2 , ограничивается резисторами R_1 и R_2 . Во избежание перегрева этих резисторов переключатель П3 переводится из одного рабочего положения в другое в течение сотых долей секунды. При питании от трансформатора преобразовательных устройств для переключения ответвлений на вторичной обмотке, к которой подключаются вентили преобразователя, широко используют схему вентиляного пе-

рехода (рис. 2.64, б). В этой схеме последовательно с нечетными контакторами К1... К5 включен вентиль В1, а последовательно с четными контакторами К2... К4 — вентиль В2. При переходе, например, с ответвления X_1 на X_2 они позволяют осуществлять замыкание контактора К2 до отключения К1, так как вентили В1 и В2 предотвращают возникновение тока короткого замыкания в части обмотки между X_1 и X_2 при одновременном включении обоих контакторов. В дальнейшем контактор К1 может быть отключен, так как цепь тока будет замкнута через контактор К2.

Трансформаторы с плавным регулированием напряжения. Трансформаторы со скользящими контактами. Для плавного регулирования выходного напряжения трансформатора применяют контактные щетки, скользящие по неизолированной внешней поверхности вторичной обмотки, вследствие чего изменяется число включаемых в работу витков обмотки. Такой метод широко используется в маломощных лабораторных автотрансформаторах (ЛАТР). С повышенной мощностью трансформаторов и автотрансформаторов применяют двойные комплекты щеток с включенными между ними резисторами для ограничения тока короткого замыкания при замыкании щетками соседних витков.

Трансформаторы с подвижной вторичной обмоткой. Такие трансформаторы имеют броневой магнитопровод с двумя первичными обмотками и подвижным средним стержнем, на котором размещена вторичная обмотка. При перемещении подвижного стержня плавно изменяется взаимоиндуктивность вторичной обмотки с каждой из первичных обмоток, вследствие чего вторичное напряжение изменяется от $+U_{max}$ до $-U_{max}$.

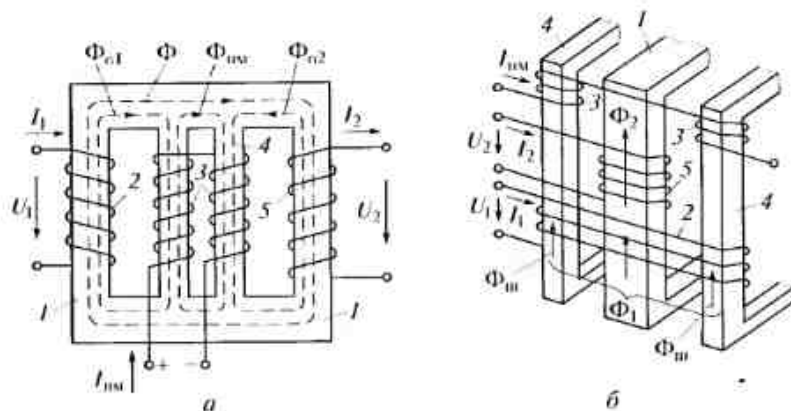


Рис. 2.65. Электромагнитные схемы однофазных ТРПШ:

а — четырехстержневой; б — с составным магнитопроводом; 1 — главные стержни; 2 — первичная обмотка; 3 — обмотка подмагничивания; 4 — магнитные шунты; 5 — вторичная обмотка

Трансформаторы, регулируемые подмагничиванием шунтов. Плавное регулирование выходного напряжения трансформатора можно осуществить также путем подмагничивания его магнитопровода постоянным током. Существует много конструкций трансформаторов с подмагничиванием. Их основными регулирующими элементами являются подмагничиваемые магнитные шунты, поэтому их называют трансформаторами и автотрансформаторами, регулируемые подмагничиванием шунтов (ТРПШ и АРПШ). На рис. 2.65, *а* изображена схема однофазного четырехстержневого ТРПШ. Магнитная система такого трансформатора состоит из двух главных стержней и двух магнитных шунтов. На главных стержнях размещены первичная и вторичная обмотки, на стержнях магнитных шунтов — обмотка подмагничивания, состоящая из двух катушек. Основной поток Φ замыкается через главные стержни, а поток подмагничивания $\Phi_{ин}$ — через магнитные шунты. Поток рассеяния $\Phi_{с1}$ и $\Phi_{с2}$ первичной и вторичной обмоток, сдвинутые по фазе приблизительно на 180° , замыкаются в основном через магнитные шунты. Трансформатор работает следующим образом. При отсутствии постоянного тока $I_{ин}$ в обмотке подмагничивания потоки $\Phi_{с1}$ и $\Phi_{с2}$ имеют максимальное значение, а основной поток Φ — минимальное. При этом вторичное напряжение U_2 минимальное. При прохождении по обмотке подмагничивающего тока магнитные шунты насыщаются и их магнитное сопротивление возрастает. Это приводит к уменьшению потоков $\Phi_{с1}$ и $\Phi_{с2}$, увеличению потока Φ и повышению напряжения U_2 . Регулируя подмагничивающий ток, можно плавно изменять вторичное напряжение U_2 .

На рис. 2.65, *б* показана схема однофазного ТРПШ с составным магнитопроводом. В этом трансформаторе магнитопровод главных стержней и магнитопроводы магнитных шунтов отделены друг от друга изоляционными прокладками. Первичная обмотка охватывает главные стержни и магнитные шунты, а вторичная обмотка — только главные стержни. Обмотка подмагничивания состоит из двух катушек и охватывает магнитные шунты. При отсутствии постоянного тока в обмотке подмагничивания магнитный поток Φ_1 трансформатора, создаваемый первичной обмоткой, равномерно распределяется между главными стержнями и магнитными шунтами. При этом во вторичной обмотке индуцируется минимальное напряжение $U_{мин}$. При прохождении по обмотке подмагничивания постоянного тока $I_{ин}$ магнитные шунты насыщаются и их магнитное сопротивление возрастает. При этом уменьшаются проходящие по ним магнитные потоки $\Phi_{ин}$, поток Φ_1 вытесняется в главные стержни и проходящий по ним поток Φ_2 увеличивается. Это приводит к возрастанию напряжения U_2 , индуцируемого во вторичной обмотке. Когда магнитные шунты полностью насыщены, магнитный поток Φ_2 в главных стержнях мак-

симальный и с трансформатора снимается максимальное напряжение U_{2max} . Таким образом, изменяя ток подмагничивания $I_{ин}$, можно плавно регулировать вторичное напряжение трансформатора.

Сварочные трансформаторы. Сварочные трансформаторы представляют собой понижающие однофазные сухие трансформаторы со вторичным напряжением при холостом ходе 60...75 В. Такое напряжение необходимо для надежного зажигания электрической дуги. При номинальной нагрузке вторичное напряжение уменьшается до 30 В.

При работе сварочных трансформаторов короткое замыкание является нормальным эксплуатационным режимом. Поэтому для ограничения тока короткого замыкания и устойчивого горения дуги этот трансформатор должен иметь крутопадающую внешнюю характеристику, а цепь сварочного тока должна обладать значительной индуктивностью. Для этого в сварочных трансформаторах обмотки размещают на различных стержнях магнитопровода и соединяют их последовательно, вследствие чего сопротивление короткого замыкания Z_k и напряжения U_k оказывается у них в несколько раз больше, чем у обычных силовых трансформаторов. Между обмотками располагают подвижные магнитные шунты, позволяющие изменять магнитные потоки рассеяния и осуществлять этим регулирование сварочного тока. В некоторых типах сварочных трансформаторов последовательно со вторичной обмоткой включают реактор L с переменной индуктивностью (рис. 2.66, *а*). Регулируя индуктивность реактора (изменяя воздушный зазор в его магнитопроводе), изменяют форму внешней характеристики 1 или 2 трансформатора (рис. 2.66, *б*) и ток дуги I_{21} или I_{22} , соответствующий напряжению горения дуги U_d .

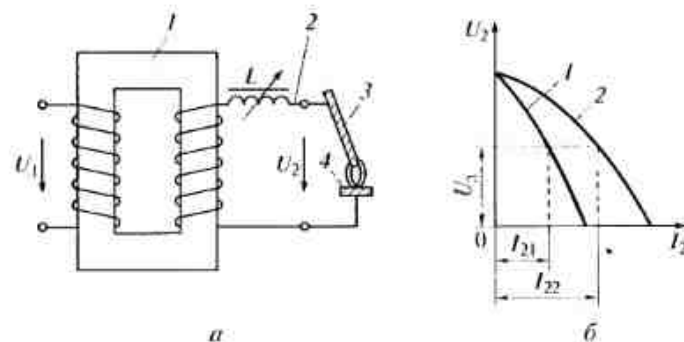


Рис. 2.66. Электрическая схема (*а*) и внешние характеристики (*б*) сварочного трансформатора:

1 — трансформатор; 2 — реактор с переменной индуктивностью; 3 — электрод; 4 — свариваемая деталь.

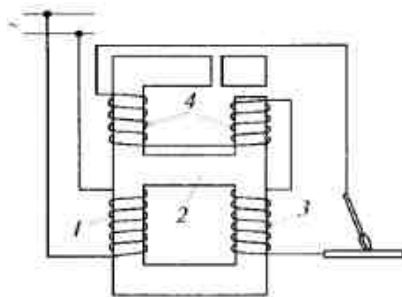


Рис. 2.67. Электромагнитная схема сварочного трансформатора со встроенным реактором:

1 — первичная обмотка; 2 — ярмо; 3 — вторичная обмотка; 4 — обмотка реактора

В некоторых конструкциях реактор непосредственно встраивают в сварочный трансформатор. Такой трансформатор имеет три обмотки: первичную 1 (рис. 2.67) вторичную 3 и обмотку реактора 4, расположенные на общем магнитопроводе. Среднее ярмо 2 является общим для цепей трансформатора и реактора. Обмотки 3 и 4 включены таким образом, что магнитный поток, создаваемый обмоткой реактора 4 в ярме 2, направлен против основного потока, создаваемого первичной обмоткой 1. Благодаря этому существенно возрастает магнитное рассеяние в трансформаторе при сравнительно небольшом поперечном сечении ярма 2. В связи с наличием в цепи нагрузки большой индуктивности сварочные трансформаторы работают с низким $\cos \alpha = 0,4 \dots 0,5$.

Печные трансформаторы. Печные трансформаторы характеризуются относительно низкими вторичными напряжениями U_2 и большими вторичными токами I_2 . Выполняются эти трансформаторы на мощности до 25 000 кВ·А при токах I_2 до 100 000 А и выше. Число витков вторичной обмотки мощных печных трансформаторов $w = 1; 1,5; 2$. Виток обмотки состоит из ряда параллельных ветвей (до 10 и более), в связи с чем важное значение приобретает вопрос о возможно более равномерном распределении тока I_2 по сечению витка и об уменьшении добавочных потерь в меди. Режим работы печных трансформаторов характеризуется резкими, вплоть до короткого замыкания, изменениями тока и соответственно возникновением частых и весьма значительных динамических эффектов в обмотках. Для обеспечения надежной работы печных трансформаторов принимаются специальные меры: печные трансформаторы проектируются с увеличенным напряжением короткого замыкания U_k ; в первичную обмотку трансформатора включают токоограничивающий реактор и придают обмоткам повышенную механическую прочность, для чего часто используют трансформатор броневого типа.

Большое значение имеет также необходимость регулирования вторичного напряжения всех фаз одновременно или раздельно. Регулирование чаще всего ведется в 4...6 ступеней, иногда в довольно широких пределах (например, в отношении 1 к 8 и более).

При одинаковых с силовыми трансформаторами мощностях печные трансформаторы тяжелее и имеют меньший КПД.

Трансформаторы для преобразования частоты. При помощи трансформаторов можно осуществить преобразование частоты переменного тока. Практическое применение получило удвоение и утроение частоты. Для увеличения частоты в большее число раз необходимо каскадное включение преобразующих трансформаторов, что связано со значительной затратой активных материалов.

На рис. 2.68 показана простейшая схема удвоения частоты. Трансформатор имеет разветвленную магнитную систему в виде двух независимых сердечников α и β . Первичная обмотка 1 имеющая w_1 витков, охватывает оба сердечника. При помощи обмотки 2 сердечники подмагничиваются в противоположных направлениях постоянным током i_0 , МДС которого $F_0 = i_0 w_2$. Обмотка 3, состоящая из двух частей с равным числом витков w_3 , которые расположены на разных сердечниках и включены встречно, генерирует ЭДС двойной частоты.

Для выяснения характера электромагнитных процессов, возникающих в удвоителе частоты, обратимся к рис. 2.69. В квадранте 1 построены характеристики $\Phi_\alpha = \psi_\alpha(i_1)$ и $\Phi_\beta = \psi_\beta(i_1)$ сердечников α и β при действии МДС F_0 в противоположных направлениях. Складывая ординаты этих характеристик, получаем магнитную характеристику суммарного потока $\Phi = \Phi_\alpha + \Phi_\beta$, сцепленного с обмоткой 1. При приложенном синусоидальном напряжении u_1 магнитный поток Φ будет практически также синусоидальным (квадрант 2). Потокосцепление $(\Phi_\alpha - \Phi_\beta)w_3$ с обмоткой 3, пропорциональное разности потоков Φ_α и Φ_β , будет меняться в зависимости от намагничивающего тока i_1 . Эта зависимость показана в квадранте 1. Задаваясь мгновенными значениями ЭДС e_1 и находя со-

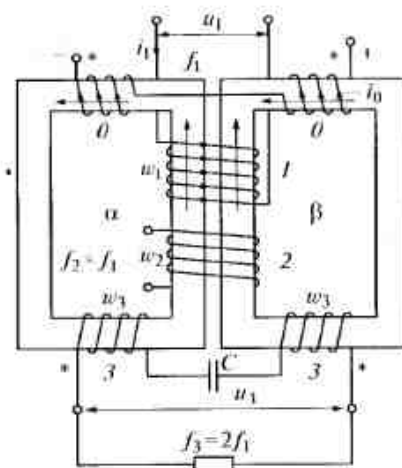


Рис. 2.68. Схема удвоения частоты: 1, 2, 3 — обмотки; α, β — сердечники

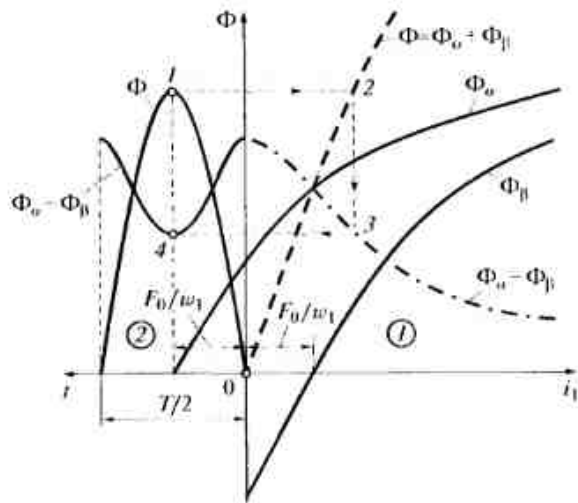


Рис. 2.69. Схема для расчета магнитного потока, сдвинутого с обмоткой двойной частоты

ответствующие им мгновенные значения магнитного потока

$\Phi = \frac{e_1}{4,44 f \omega_1}$, легко по точкам 1—2—3—4 построить зависимость $(\Phi_\alpha - \Phi_\beta) = \xi(t)$, показанную в квадрате 2. Она имеет пульсирующий характер с частотой пульсаций, равной $2f_1$. Кривая ЭДС получается при этом несимметричной и имеет четные гармонические составляющие (рис. 2.70). Для снижения падения напряжения в цепи обмотки 3 при присоединении к ней нагрузки следует последовательно с обмоткой включить соответственно рассчитанную емкость C , компенсирующую индуктивность обмотки (см. рис. 2.68). Регулирование напряжения осуществляется изменением тока подмагничивания i_0 .

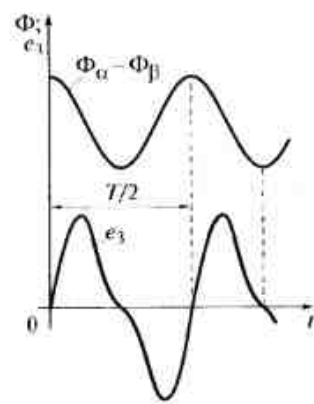


Рис. 2.70. Форма кривой ЭДС двойной частоты

Для лучшего использования магнитной системы удвоителя частоты целесообразно размещать на его сердечнике также обмотку 2 (см. рис. 2.68) при помощи которой можно трансформировать переменный ток частоты f_1 . В этом случае удастся экономично совместить обычный трансформатор с удвоителем частоты. Питая три удвоителя частоты от различных фаз трехфазной системы, можно получить на зажимах обмоток 3 трехфазную систему напряжений удво-

енной частоты $2f_1$. Утроение частоты при помощи трансформаторов можно осуществить по схеме, представленной на рис. 2.71. При соединении первичных обмоток 1 трех однофазных трансформаторов по схеме звезда нарушаются условия свободного намагничивания сердечников и в магнитном потоке каждой фазы (помимо основной гармонической) возникает значительная третья гармоническая. Эта составляющая магнитного потока наводит в обмотках каждой фазы ЭДС тройной частоты. Если обмотки 3 всех трансформаторов соединить последовательно по схеме открытого треугольника, то на зажимах a_3x_3 будет действовать напряжение u_3 частоты $f_3 = 3f_1$: первая гармоническая составляющая в напряжении U_3 будет отсутствовать, так как в трех фазах в сумме первая гармоническая в напряжении U_3 будет отсутствовать, так как в трех фазах в сумме первая гармоническая равна нулю. Для компенсации падения напряжения в обмотках 3 при нагрузке следует включать в цепь обмоток соответственно рассчитанную емкость C .

Для лучшего использования магнитной системы утроителя частоты целесообразно размещать на его сердечниках также обмотки 2, соединенные по схеме звезда, при помощи которых можно трансформировать трехфазный ток частоты f_1 . Такое совмещение трехфазного трансформатора с утроителем частоты позволяет одновременно использовать как первую, так и третью гармоническую магнитного потока.

Трансформаторы для вентильных преобразователей. При использовании трансформаторов в вентильных преобразователях в цепи их вторичных обмоток включают электрические вентили, пропускающие ток только в одном направлении. Характерной особенностью этих трансформаторов является неодновременная нагрузка отдельных фаз, связанная с поочередным отпиранием вентилей, включенных в соответствующие фазы. Это обстоятельство вызы-

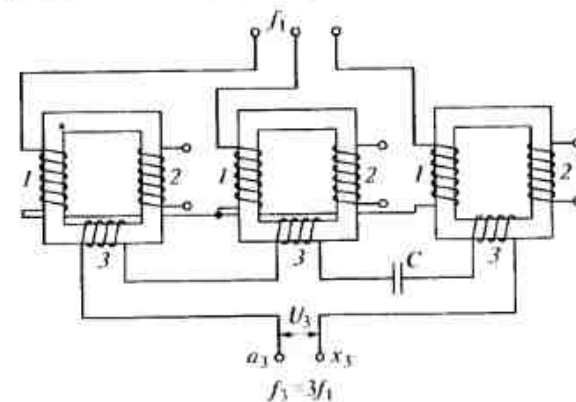


Рис. 2.71. Схема утроения частоты:
1...3 — обмотки

вает ряд неблагоприятных последствий, основными из которых являются наличие в кривых первичного I_1 и вторичного I_2 токов значительных высших гармонических и дополнительное подмагничивание сердечника при некоторых схемах выпрямления. В рассматриваемых трансформаторах различают сетевую обмотку, подключаемую к питающей сети, и вентильную обмотку, к которой подключают вентили преобразователя. Обычно сетевые обмотки трехфазных трансформаторов соединяют по схеме звезда или треугольник. Вентильные обмотки соединяют так, чтобы обеспечить преобразование одно- или трехфазного тока в многофазный с числом фаз, необходимым для соответствующей схемы преобразователя. При увеличении числа фаз преобразователя резко уменьшаются пульсации выпрямленного напряжения. В трансформаторах, предназначенных для вентильных преобразователей, по первичной и вторичной обмоткам проходят несинусоидальные токи, содержащие ряд высших гармонических. Это обусловлено следующими причинами:

- вентили, включенные в цепи отдельных фаз вторичной обмотки, пропускают ток только в течение части периода;
- на стороне постоянного тока преобразователя обычно включают сглаживающий дроссель значительной индуктивности, при котором токи в обмотках трансформатора имеют форму, близкую к прямоугольной.

В общем случае токи i_1 и i_2 имеют разные действующие значения, вследствие чего расчетные мощности первичной $S_{1н}$ и вторичной $S_{2н}$ обмоток неодинаковы. Поэтому используют понятие типовой мощности трансформатора вентильного преобразователя

$$S_T = 0,5(S_{1н} + S_{2н}) \quad (2.128)$$

и коэффициент типовой мощности

$$k_T = \frac{S_T}{P_{дн}}, \quad (2.129)$$

где $P_{дн} = I_{дн} U_{дн}$ — мощность, потребляемая на стороне постоянного тока преобразователя (выходная мощность); $I_{дн}$ и $U_{дн}$ — номинальные значения тока и напряжения на стороне постоянного тока.

Типовая мощность вентильного трансформатора S_T больше его выходной мощности $P_{дн}$ при номинальной нагрузке. Поэтому габаритные размеры и масса таких трансформаторов всегда больше, чем у трансформаторов той же номинальной мощности, но работающих при синусоидальном токе. Физически это объясняется тем, что нагрев обмоток трансформатора определяют действующие значения токов I_1 и I_2 , которые в данном случае содержат ряд высших гармонических. При работе трансформатора в цепи синусоидального тока высших гармонических нет, нагрев трансформатора при той же выходной мощности меньше, поэтому его можно выполнить с меньшими габаритными размерами и массой. Каждой схеме включения вентилей и характеру нагрузки (активная, активно-индуктивная), определяющему форму выпрямленного тока, соответствует определенное значение типовой мощности S_T . При работе преобразователя на чисто активную нагрузку токи вентильной и сетевой обмоток имеют кусочно-синусоидальную форму (т.е. представляют собой части синусоиды), вследствие чего при одинаковом значении тока I_d их действующие значения больше, чем при идеально сглаженном выпрямленном токе. В результате и типовая мощность трансформатора характеризуется большим значением.

При использовании в преобразователе управляемых вентилей типовая мощность трансформатора может возрасти, если номинальное выпрямленное напряжение $U_{дн}$ соответствует некоторому заданному значению угла регулирования вентилей α_n , отличному от нуля. Это может быть, например, в случае если необходимо обеспечить стабильное значение $U_d = U_{дн}$ при уменьшении напряжения U_1 в питающей сети (когда требуется иметь некоторый запас по напряжению U_2). В этом случае коэффициент типовой мощности

$$k_T = \frac{k_{T0}}{\cos \alpha_n},$$

где k_{T0} — значение коэффициента типовой мощности для соответствующей схемы включения вентилей при отсутствии регулирования.

В нулевых схемах выпрямления (одно-, трех- и шестифазной) нарушается равновесие МДС в фазах сетевой и вентильной обмоток, расположенных на общем стержне трансформатора, вследствие чего происходит дополнительное подмагничивание его магнитной системы. Эти схемы называют одноктактными, так как при работе преобразователя ток по каждой фазе вентильной обмотки проходит только в одном направлении. Дополнительное подмагничивание магнитопровода трансформатора возникает также и при применении однополупериодной схемы выпрямления. Рассмотрим более подробно это явление на примере трехфазной нулевой схемы (рис. 2.72, а), работающей при идеализированных условиях. В этом случае через три фазы вентильной обмотки трансформатора в течение каждой трети периода поочередно, проходят токи i_{2a} , i_{2b} и i_{2c} прямоугольной формы (рис. 2.72, б), мгновенные значения которых равно I_d . По первичной обмотке трансформатора также проходят токи i_{1a} , i_{1b} и i_{1c} прямоугольной формы. Однако распределение этих токов по отдельным фазам неравномерно.

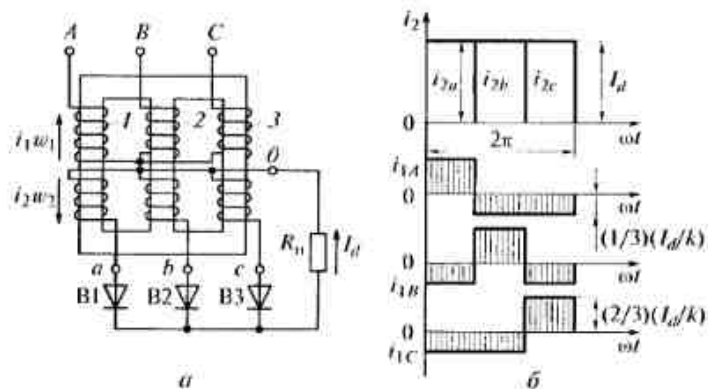


Рис. 2.72. Трехфазная нулевая схема выпрямления (а) и график изменения тока в сетевой и вентиляльной обмотках (б):

В — вентиль; 1...3 — обмотки трансформатора

В течение первой трети периода, когда работает вентиль В1, ток i_{2a} равен току I_d , а токи i_{2b} и i_{2c} равны нулю. Токи в фазах первичной обмотки можно определить исходя из первого правила Кирхгофа для электрических цепей, т. е.

$$i_{2A} + i_{2B} + i_{2C} = 0, \quad (2.130)$$

а также из условий равновесия МДС для замкнутых магнитных контуров, один из которых охватывает стержни трансформатора 1, 2:

$$i_{1A}w_1 - i_{2a}w_2 - i_{1B}w_1 = 0, \quad (2.131)$$

а другой — стержни 2 и 3:

$$i_{1B}w_1 - i_{1C}w_1 = 0. \quad (2.132)$$

Решая совместно полученные уравнения, для первой трети периода получаем

$$\begin{aligned} i_{1A} &= \frac{2}{3} i_{2a} \frac{w_2}{w_1} = \frac{2}{3} \frac{I_d}{k}; \\ i_{1B} &= \frac{1}{3} i_{2a} \frac{w_2}{w_1} = -\frac{1}{3} \frac{I_d}{k}; \\ i_{1C} &= -\frac{1}{3} i_{2a} \frac{w_2}{w_1} = -\frac{1}{3} \frac{I_d}{k}. \end{aligned} \quad (2.133)$$

Следовательно, в каждом стержне трансформатора в указанный период времени действует некомпенсированная МДС, рав-

ная $i_1 w_1 - i_2 w_2 = -\frac{1}{3} I_d w_2$, которая создает дополнительный магнитный поток Φ_d , накладывающийся на основной поток Φ . Из диаграммы распределения токов по обмоткам, приведенной на рис. 2.72, б, видно, что в следующие две трети, когда работают вентиля В2 и В3, направление и величина потока Φ_d не изменяются, поскольку относительное распределение тока между первичными и вторичными обмотками сохраняется.

Дополнительный поток Φ_d называют потоком вынужденного намагничивания. Он проходит через каждый стержень трансформатора и замыкается через воздух и кожух так же, как и третьи гармонические основного потока. Для того чтобы поток Φ_d не вызвал недопустимого насыщения магнитной системы, увеличивают общее сечение стержней, что приводит к повышению массы, габаритных размеров и стоимости трансформатора. Поэтому трехфазную нулевую схему выпрямления применяют лишь в выпрямителях сравнительно небольшой мощности. Обычно в выпрямителях используют только такие схемы включения вентилялей, которые обеспечивают нормальное намагничивание сердечника трансформатора и равновесие МДС на каждом стержне. К их числу относятся мостовые одно- и трехфазная, так как при их использовании ток в каждой фазе вентиляльной обмотки дважды за период изменяет свое направление. Не возникает потока вынужденного подмагничивания и при соединении вентиляльной обмотки по схеме две обратные звезды с уравнительным реактором. При нулевых схемах выпрямления для устранения явления вынужденного подмагничивания вентиляльную обмотку соединяют по схеме Z_n . В этом случае в двух частях вентиляльной обмотки появляются постоянные составляющие МДС, которые всегда направлены встречно и взаимно компенсируются. Для обеспечения более полной компенсации применяют также симметричное расположение обмоток на стержнях и их транспозицию, например при однофазной нулевой схеме выпрямления.

Измерительные трансформаторы. Измерительные трансформаторы используют для подключения электроизмерительных приборов в цепи переменного тока высокого напряжения. При этом электроизмерительные приборы оказываются изолированными от цепей высокого напряжения, что обеспечивает безопасность работы обслуживающего персонала. Кроме того, измерительные трансформаторы позволяют расширить пределы измерения приборов, т. е. измерять большие токи и напряжения с помощью сравнительно несложных приборов, рассчитанных для измерения малых токов и напряжений. В ряде случаев измерительные трансформаторы служат для подключения к цепям высокого напряжения обмоток реле, обеспечивающих защиту электрических установок от аварийных режимов.

Различают два типа измерительных трансформаторов — трансформаторы напряжения и трансформаторы тока. Первые служат для включения вольтметров, а также других приборов, реагирующих на значение напряжения (например, катушек напряжения ваттметров, счетчиков, фазометров и различных реле), вторые — для включения амперметров и токовых катушек указанных приборов. Измерительные трансформаторы изготавливают мощностью от пяти до нескольких сотен вольт-ампер; они рассчитаны для совместной работы со стандартными приборами (амперметрами на 1; 2; 2,5 и 5 А, вольтметрами на 100 и $100\sqrt{3}$ В).

Трансформатор напряжения. Трансформатор напряжения выполняют в виде двухобмоточного понижающего трансформатора (рис. 2.73, а). Для обеспечения безопасности работы обслуживающего персонала вторичную обмотку тщательно изолируют от первичной и заземляют. Условное обозначение трансформатора напряжения такое же, как двухобмоточного трансформатора. Поскольку сопротивления обмоток вольтметров и других приборов, подключаемых к трансформатору напряжения, велики, то он практически работает в режиме холостого хода. В этом режиме можно с достаточной степенью точности считать, что

$$U_1 = U'_2 = U_2 k.$$

В действительности ток холостого хода I_0 (а также небольшой ток нагрузки) создает в трансформаторе падение напряжения, поэтому, как видно из векторной диаграммы (рис. 2.73, б), $U'_2 \neq U_1$ и между векторами этих напряжений имеется некоторый сдвиг по

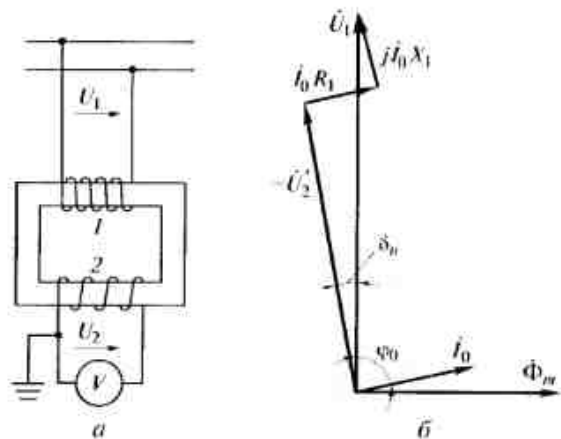


Рис. 2.73. Схема включения (а) и векторная диаграмма (б) измерительного трансформатора напряжения;

1, 2 — обмотки

фазе δ_u . В результате этого при измерениях образуются некоторые погрешности. В измерительных трансформаторах напряжения различают два вида погрешностей:

- относительная погрешность напряжения, %:

$$\gamma_u = \frac{U_2 k - U_1}{U_1} 100; \quad (2.134)$$

- угловая погрешность δ_u ; за ее значение принимают угол между векторами U_1 и $-U'_2$. Она влияет на результаты измерений, выполненных с помощью ваттметров, счетчиков, фазометров и прочих приборов, показания которых зависят не только от силы тока и напряжения, но и от угла сдвига фаз между ними. Угловая погрешность считается положительной, если вектор U'_2 опережает вектор U_1 .

В зависимости от значения допускаемых погрешностей стационарные трансформаторы напряжения подразделяют на три класса точности: 0,5; 1 и 3; а лабораторные — на четыре класса: 0,05; 0,1; 0,2 и 0,5. Обозначение класса соответствует значению относительной погрешности γ_u при номинальном напряжении $U_{ном}$.

Значения погрешностей стационарных трансформаторов напряжения согласно стандарту приведены в табл. 2.6.

Выпускаемые промышленностью трансформаторы напряжения сохраняют класс точности при изменении первичного напряжения от 80 до 120 % номинального.

Для уменьшения значений погрешностей δ_u и γ_u сопротивления обмоток трансформатора Z_1 и Z_2 делают по возможности малыми, а магнитопровод выполняют из высококачественной стали достаточно большого поперечного сечения, чтобы в рабочем режиме он не насыщался. Благодаря этому обеспечивается значительное уменьшение тока холостого хода.

Трансформатор тока. Трансформатор тока выполняют в виде двухобмоточного повышающего трансформатора (рис. 2.74, а) или в виде проходного трансформатора, у которого первичной обмоткой служит провод, проходящий через окно магнитопровода. В некоторых конструкциях магнитопровод и вторичная обмотка смонтированы на проходном изоляторе, служащем для ввода высокого

Таблица 2.6

Погрешность	Класс точности		
	0,5	1	3
Максимальная относительная при напряжении $(0,8 - 1,2)U_{ном}$	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$	$\pm 3,0$
Угловая, мин	± 20	± 40	Не нормирована

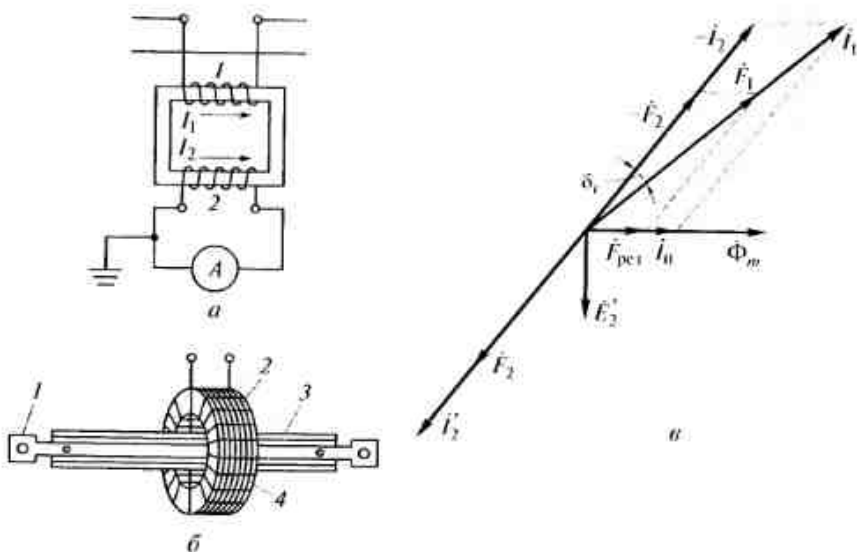


Рис. 2.74. Схема включения трансформатора тока (а), общий вид проходного трансформатора (б) и векторная диаграмма (в):

1 — медный стержень (первичная обмотка); 2 — вторичная обмотка; 3 — изолятор; 4 — магнитопровод

напряжения в силовой трансформатор или другую электрическую установку. Первичной обмоткой трансформатора служит медный стержень, проходящий внутри изолятора (рис. 2.74, б).

Сопротивления обмоток амперметров и других приборов, подключаемых к трансформатору тока, обычно малы. Поэтому он практически работает в режиме короткого замыкания, при котором токи I_1 и I_2' во много раз больше тока I_0 , и с достаточной степенью точности можно считать, что

$$I_1 = I_2' = \frac{I_2}{k} \quad (2.135)$$

В действительности в связи с наличием холостого хода ($I_0 \neq I_0'$) в рассматриваемом трансформаторе $I_1 \neq I_2'$ и между векторами этих токов имеется некоторый угол, отличный от 180° (рис. 2.74, в). Это создает относительную токовую погрешность, %:

$$\gamma_t = \frac{I_2 k - I_1}{I_1} 100 \quad (2.136)$$

и угловую погрешность, измеряемую углом δ_1 между векторами I_1 и $-I_2'$. Погрешность δ_1 считается положительной, если вектор $-I_2'$ опережает вектор I_1 .

Класс точности	Значения первичного тока от номинального, %	Предельное значение погрешности		Предельные значения токовой нагрузки от номинальной при $\cos \varphi_1 = 0,8$
		токовой, %	угловой, мин	
0,2	10	$\pm 0,50$	± 20	25 — 100
	20	$\pm 0,35$	± 35	
	100 — 120	$\pm 0,20$	± 30	
0,5	10	$\pm 1,0$	± 60	25 — 100
	20	$\pm 0,75$	± 45	
	100 — 120	$\pm 0,50$	± 30	
1	10	$\pm 2,0$	± 120	25 — 100
	20	$\pm 1,5$	± 90	
	100 — 120	$\pm 1,0$	± 60	
3	50 — 120	$\pm 3,0$	Не нормируется	50 — 100
10	50 — 120	$\pm 10,0$	То же	50 — 100

В зависимости от значения допускаемых погрешностей трансформаторы тока подразделяют на пять классов точности: стационарные — на классы 0,2; 0,5; 1; 3 и 10; лабораторные — на классы 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2. Приведенные цифры соответствуют допускаемой для данного класса токовой погрешности при номинальном значении тока. Значения погрешностей стационарных трансформаторов тока согласно стандарту приведены в табл. 2.7.

2.19. Испытания силовых трансформаторов

Для силовых трансформаторов программы периодических, типовых, приемочных и приемосдаточных испытаний приведены в ГОСТ 11677—85.

Программы периодических, типовых и приемочных испытаний в основном совпадают и включают в себя следующие этапы: проверку коэффициента трансформации и группы соединения обмоток; определение сопротивления обмоток постоянному току; проверку тока и потерь холостого хода, потерь и напряжения короткого замыкания на основных ответвлениях обмоток; измерение сопротивлений нулевой последовательности; определение параметров изоляции; испытания на нагревание; стойкость к коротким замыканиям и на плотность бака; проверку уровня звука; испытание на стойкость к ударам толчков нагрузки; проб масла из бака масляного трансформатора и контакторного устройства, име-

ющего гашение дуги в масле; определение влагосодержания и содержания механических примесей для масла из бака трансформатора; испытание контакторного устройства в сборе с трансформатором.

При испытаниях на пробах масла определяют их пробивное напряжение. Для трансформаторов мощностью до 6,3 МВ·А класса напряжения до 35 кВ допускается пробы масла брать не реже одного раза в день из емкости, служащей для заливки масла в трансформаторы.

В программу приемо-сдаточных испытаний силовых трансформаторов входит большинство этапов приведенной программы приемных испытаний, за исключением измерения сопротивлений нулевой последовательности, испытаний на нагревание, стойкость к коротким замыканиям, проб масла и устройств РПН в сборе с трансформатором.

Проверка коэффициента трансформации. Измерение коэффициента трансформации проводится с большой точностью на всех ответвлениях обмотки и для всех фаз. Если такая проверка невозможна для отдельных ответвлений на собранном трансформаторе в связи с их недоступностью, то проверку выполняют до полной сборки трансформатора. В обмотках, состоящих из частей, соединенных параллельно, проверяют разницу количества витков этих частей на полностью собранном трансформаторе или, если это невозможно, до полной сборки. Проверяемые параллельные части обмотки соединяются последовательно так, чтобы ЭДС, наводимые в частях обмотки при возбуждении стержня магнитной системы, на который они насажены, были направлены встречно. К свободным отводам последовательно соединенных частей обмотки подключают вольтметр с высоким (не менее 10 кОм) входным сопротивлением. Возбуждение магнитной системы осуществляется любой обмоткой (или обмотками), расположенной (или расположенными) на одном стержне с испытываемыми частями обмотки (или обмоток).

Разница количества витков параллельных частей обмотки определяется по формуле

$$n = \frac{U w_n}{U_n},$$

где n — разница в числе витков параллельных частей обмотки; U — напряжение на свободных отводах последовательно соединенных частей обмотки; W ; w_n — число витков возбуждаемой обмотки; U_n — напряжение, подводимое к возбуждаемой обмотке, В.

Полученное значение n следует округлить до целого (если n меньше 0,5, то принять его равным нулю).

После первого этапа испытаний, если выявляется разница в числе витков в параллельно соединенных частях обмотки, следует определить часть обмотки, содержащую большее число витков. Это можно осуществить непосредственным измерением напряжений, наводимых в этих частях обмотки, и сопоставлением результатов измерений. Часть обмотки с большим числом витков можно найти и другим способом. К одной из частей обмотки последовательно присоединяют один виток того же направления намотки, что и остальные витки этой части, а затем повторяют измерения, необходимые для расчетов. При этом число n должно или увеличиться на единицу (тогда заключают, что большее число витков находится в той части обмотки из двух соединенных параллельно, к которой присоединили дополнительный виток), или уменьшиться на единицу (тогда заключают, что число витков больше в той части, к которой дополнительный виток не присоединяли).

Для обеспечения необходимой точности измерений сопротивление проводов цепи измерения не должно быть более 0,001 внутреннего сопротивления вольтметра.

Определение коэффициента трансформации трехфазных трансформаторов характеризуется следующими особенностями. Обычно при испытаниях измеряют линейные напряжения, подключая трехфазные первичные обмотки к источнику напряжения. Если имеется возможность, то допускается определять коэффициент трансформации по фазным напряжениям соответствующих фаз. При этом напряжение, подаваемое на первичные обмотки, может быть одно- или трехфазным. Если трехфазные трансформаторы имеют соединение по схеме Δ/Y и Y/Δ , то коэффициент трансформации по фазным напряжениям определяют при поочередном коротком замыкании фаз. При этом замыкают линейные зажимы одной из фаз, соединенных по схеме треугольник, затем при однофазном питании обмотки определяют коэффициент трансформации оставшейся свободной пары фаз. Для схемы Δ/Y и при питании со стороны звезды коэффициент трансформации равен $2k_{\phi}$, где k_{ϕ} — фазный коэффициент трансформации. Для схем Y/Δ и при питании со стороны треугольника коэффициент трансформации будет равен $0,5k_{\phi}$. Аналогичные измерения проводят при коротких замыканиях двух других фаз.

Если линейные напряжения, подводимые к трехфазному трансформатору, симметричны, т.е. отличие между наибольшим и наименьшим значениями линейного напряжения не превышает 2%, выполняют измерения при трехфазном питании первичной обмотки.

Для трехобмоточных трансформаторов с расщепленными обмотками не нужно определять коэффициент трансформации для всех возможных вариантов. Достаточно проверить его для двух пар

обмоток; при этом измерения на всех ответвлениях каждой из обмоток достаточно произвести один раз.

Ряд трансформаторов имеет устройство переключения ответвлений обмоток с так называемым предызбирателем ответвлений, предназначенным для реверсирования регулировочной части обмотки или переключения грубых ступеней регулирования. В этом случае измерения допускаются производить при одном положении предызбирателя ответвлений, соответствующем меньшему из значений напряжений на регулируемой обмотке. Дополнительно можно провести по одному измерению на всех других положениях предызбирателя ответвлений.

Коэффициент трансформации измеряют методом моста или методом двух вольтметров.

Для использования метода моста применяют специальные мосты или компенсационные установки, которые позволяют измерить коэффициент трансформации с точностью не менее четырех значащих цифр.

Для измерения методом двух вольтметров необходимы вольтметры класса 0,2. Применяемые при этом методе трансформаторы напряжения и добавочные резисторы также должны иметь класс не ниже 0,2. Измерения обими вольтметрами производят одновременно. Подводимое при измерении напряжение не должно превышать номинальное напряжение трансформатора и составлять не менее 1% его значения.

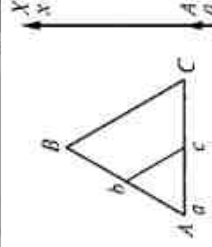
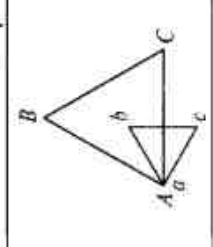
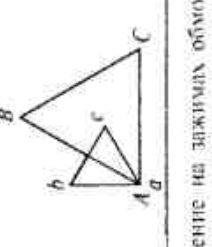
Проверка группы соединений обмоток. Для включения трансформаторов на параллельную работу необходимо знать группу их соединений. Определить группу соединений обмоток трансформатора можно одним из следующих методов: прямым, двух вольтметров; моста и постоянного тока.

Прямой метод. Для измерения используют фазометр. Последовательную обмотку однофазного фазометра присоединяют через резистор к зажимам первичной обмотки, а параллельную обмотку фазометра — к одноименным зажимам другой обмотки той же фазы испытываемого трансформатора. К первичной обмотке испытываемого трансформатора подводят напряжение, достаточное для нормальной работы фазометра. Удобнее применять четырехкватратные фазометры. По измеренному угловому смещению в соответствии с табл. 2.8 можно определить группу соединений.

Для определения группы соединений очень удобны специальные приборы — группометры, которые представляют собой электронный или логотрический фазометр, проградуированный непосредственно в числах, характеризующих группу соединения.

При определении группы соединений трехфазных трансформаторов производят не менее двух измерений (для двух пар соответствующих линейных зажимов).

Таблица 2.8

Группа соединения	Угловое смещение электролизирующих свд.	Схема соединения обмоток	Векторная диаграмма линейных ЭДС	Формула для вычисления линейных напряжений		
				U_{b-a}	U_{c-b}	U_{c-a}
0	0	Y/Y Δ/Δ Δ/Z		$U_{11}\sqrt{1-k_1+k_2}$	$U_{11}\sqrt{1-k_1+k_2}$	$U_{11}\sqrt{1-k_1+k_2}$
I	30	Y/Δ Δ/Y Δ/Z		$U_{11}\sqrt{1-\sqrt{3}k_1+k_2}$	$U_{11}\sqrt{1+k_1}$	$U_{11}\sqrt{1+k_2}$
II	330	Y/Δ Δ/Y Y/Z		$U_{11}\sqrt{1-\sqrt{3}k_1+k_2}$	$U_{11}\sqrt{1+k_1}$	$U_{11}\sqrt{1-\sqrt{3}+k_1+k_2}$

Примечание. U_{11} — линейное напряжение на зажимах обмотки высшего напряжения при испытании; k_1 — линейный коэффициент трансформации.

Метод двух вольтметров. При использовании этого метода соединяют зажимы A и a испытываемого трансформатора. К одной из обмоток подводят напряжение и измеряют вольтметром V_2 (последовательно) напряжения между зажимами $b-B$, $b-C$, и $c-B$ — при испытании трехфазных трансформаторов или между зажимами $x-X$ — при испытании однофазных трансформаторов. Измеренные напряжения U_{b-B} , U_{b-C} , U_{c-B} или U_{x-X} сравнивают с соответствующими расчетными напряжениями, вычисленными по формулам в соответствии с табл. 2.8.

Если при измерениях используется трансформатор напряжения, то найденный по показаниям вольтметров линейный коэффициент трансформации k_v следует разделить на коэффициент трансформации трансформатора напряжения.

Метод моста. Этот метод применяют при определении группы соединения обмоток трансформатора одновременно с измерением коэффициента трансформации с помощью компенсационного моста.

Метод постоянного тока. Данный метод применяют в однофазных трансформаторах, а также в трехфазных со схемой соединения обмоток Y_0/Y_0 и в случае соединения обмоток Δ/Δ , когда соединение по схеме треугольник выполняется вне бака трансформатора. Для этого поочередно проверяют полярность зажимов $A-X$ и $a-x$ с помощью магнитоэлектрического вольтметра V_m ; к зажимам $A-X$ через ключевой элемент подводят напряжение постоянного тока от 2 до 12 В. Полярность зажимов $A-X$ устанавливают при замыкании ключа. После проверки полярности зажимов $A-X$ вольтметр отсоединяют, оставив провода, и присоединяют его к зажимам $a-x$. Полярность зажимов $a-x$ устанавливают в моменты замыкания и размыкания ключа. Если полярность зажимов $a-x$ при замыкании ключа окажется одинаковой с полярностью зажимов $A-X$, а при размыкании — разной, то трансформатор относят к группе соединений 0, а в противоположном случае — к группе соединений 6.

В трехфазных трансформаторах обмотки, соединенные в треугольник, разъединяют и определяют полярность пар обмоток путем поочередного подведения напряжения к зажимам $A-X$ и $a-x$, $B-Y$ и $b-y$, $C-Z$ и $c-z$. В трехфазных трансформаторах, у которых обмотки соединены по схеме Y_0/Y_0 , напряжение подводят поочередно к зажимам $A-0$ и $a-0$, $B-0$ и $b-0$, $C-0$ и $c-0$. При этом пары обмоток, не участвующие в опытах, остаются разомкнутыми.

Измерение сопротивлений обмоток трансформатора постоянному току. Для измерения сопротивлений используют методы моста или падения напряжения. Значение тока при измерениях не должно превышать 0,2 от номинального тока обмотки. Если длительность измерения не превышает 60 с, то допускается значение тока до 0,5 от номинального тока обмотки. В целях снижения времени

установления тока его значение рекомендуется выбирать не менее $2\sqrt{2}I_0$, где I_0 — действующее значение тока холостого хода при номинальном напряжении трансформатора.

Обычно сопротивления измеряют на всех ответвлениях обмоток, доступных для подключения измерительных приборов, а также при всех положениях устройства переключения ответвлений. Если устройство переключения ответвлений имеет предызбиратель ответвлений, то измерения выполняют при одном положении предызбирателя ответвлений. Дополнительно производят по одному измерению сопротивления на каждом из других положений предызбирателя ответвлений.

При наличии зажимов нейтрали кроме измерения линейных сопротивлений обмоток можно измерить одну из фазных сопротивлений.

Установившимся показанием прибора считается показание, которое за время не менее 30 с изменяется не более чем на 1 %.

Измерение напряжения на обмотке трансформатора производят методом падения напряжения. Если измеряемое сопротивление мало (менее 1 Ом), то провода вольтметра присоединяют непосредственно к зажимам трансформатора. Тогда, если расчетное значение измеряемого сопротивления (Ом) составляет более 0,5 % сопротивления вольтметра, значение этого сопротивления равно

$$R' = \frac{R}{1 - (R/R_1)}$$

где R — сопротивление, определяемое по измеренным значениям тока и напряжения, Ом; R_1 — сопротивление вольтметра, Ом.

При измерении сопротивлений, больших 1 Ом, провода вольтметра присоединяют после амперметра. Если при этом сопротивления амперметра и подводящего провода, соединяющего зажимы амперметра и трансформатора, составляют более 0,5 % значения измеряемого сопротивления, то после вычисления общего сопротивления цепи из него вычитают значение сопротивления амперметра и подводящего провода.

Измерения тока и напряжения проводят при установившихся показаниях приборов. Вольтметр необходимо включать при установившемся значении тока, а отключать до отключения тока.

При измерении сопротивления обмотки необходимо знать ее температуру. В отключенном и не подвергавшемся нагреву не менее 20 ч масляном трансформаторе температура обмотки приравнивается температуре верхних слоев масла при условии, что измерение сопротивления будут проводить не ранее чем через 1 ч после заливки масла для трансформаторов сравнительно небольшой мощности (до 1 МВ·А включительно) и не ранее чем через 2 ч для трансформаторов большей мощности. Если трансформатор

не включался и не подвергался подогреву не менее 3 ч до выполнения измерений, то за температуру обмотки можно принять температуру средних слоев масла, определяемую как полусумму температур верхних и нижних слоев.

Для сухих трансформаторов и масляных, но сравнительно небольшой мощности (до 1 МВ·А), при измерениях, производимых на активных частях трансформаторов, находящихся в помещениях с неизменной температурой воздуха (с предельным отклонением $\pm 3^\circ\text{C}$), за температуру обмотки принимают температуру окружающего воздуха, измеренную на высоте примерно 1,5 м от пола, на котором установлен трансформатор и не более чем в 5 м от него. Термометр погружают в сосуд с одинарными стенками, заполненный трансформаторным маслом.

При невозможности выдержать условие неизменности температуры окружающего воздуха за температуру обмотки принимают среднее арифметическое показаний трех термометров, установленных на поверхности одной из наружных обмоток с трех сторон примерно на середине высоты.

Проверка тока и потерь холостого хода. Проверка при номинальных условиях. Обычно ток и потери холостого хода измеряют при номинальном напряжении, но иногда необходимо измерить ток и потери при малом напряжении, что обычно оговаривается в стандартах или технических условиях на отдельные типы трансформаторов.

При опыте холостого хода напряжение, подаваемое к одной из обмоток (обычно низшего напряжения), должно быть номинального значения, номинальной частоты, практически синусоидальной формы, а при испытании трехфазного трансформатора, кроме того, — практически симметричное.

Практически синусоидальным считается такое напряжение, у которого любая ордината отличается от соответствующей ординаты синусоиды на отрезок, не превосходящий 5% ординаты синусоиды. Синусоидальность напряжения проверяют с помощью электронно-лучевого осциллографа, на экран которого наносят две одинаковые линии синусоидальной формы, сдвинутые по вертикали одна относительно другой на 10% их амплитуды. На вход осциллографа падают испытываемое напряжение. Если кривую подаваемого напряжения удастся ввести внутрь полосы, ограниченной указанными линиями, то напряжение считают практически синусоидальным. Можно оценить синусоидальность кривой напряжения и по результатам одновременного измерения среднего и действующего значений напряжений. Кривая считается синусоидальной, если отношение действующего значения напряжения к среднему отличается от 1,11 не более чем на $\pm 2\%$.

Проверка при несинусоидальном напряжении. Когда кривая напряжения отличается от практически синусоидальной, необходимо внести поправку в результаты измерений. С этой целью прово-

дят два измерения. При первом измерении подводимое напряжение регулируют так, чтобы его среднее значение, измеренное вольтметром средних значений, было равно действующему значению номинального напряжения $U_{ном}$, деленному на 1,11, и одновременно измеряют ток I_0 , потери холостого хода P'_0 и действующее значение приложенного напряжения U'_0 . При втором измерении подводимое напряжение изменяют так, чтобы его действующее значение было равно номинальному значению напряжению, и вновь регистрируют ток и потери холостого хода.

Искомые потери холостого хода P_0 рассчитывают по формуле

$$P_0 = \frac{P'_0}{P_1 + \left(\frac{U'}{U_{ном}}\right)^2 P_2}; \quad (2.137)$$

где P_1 — доля потерь, обусловленная гистерезисом; P_2 — доля потерь, обусловленная вихревыми токами.

При значениях магнитной индукции в сердечнике трансформатора, равной 1,2...1,7 Тл, для холоднокатаной стали принимают $P_1 = 0,5$ и $P_2 = 0,5$; для горячекатаной стали — $P_1 = 0,8$ и $P_2 = 0,2$.

Проверка при частоте, отличающейся от номинальной. Если при испытаниях невозможно установить номинальную частоту, то допускается отклонение частоты от номинальной (но не более чем на $\pm 2\%$). При этом вводится поправка на подводимое при испытаниях напряжение, которое устанавливают равным

$$U = \frac{U_{ном} f}{f_{ном}}; \quad (2.138)$$

где $U_{ном}$ — номинальное напряжение, В; f — частота подводимого напряжения, Гц; $f_{ном}$ — номинальная частота, Гц.

Потери холостого хода P_0 с поправкой на отклонение частоты сети от номинальной определяют по формуле

$$P_0 = \frac{P_{0f}}{P_2 \left(\frac{f}{f_{ном}}\right)^2 + P_1 \frac{f}{f_{ном}}}; \quad (2.139)$$

где P_{0f} — потери, измеренные при частоте f , Вт.

На измеренные токи холостого хода поправка не требуется.

Проверка при симметричном трехфазном напряжении. Для трехфазных трансформаторов кроме указанных требований при испытаниях необходимо, чтобы трехфазная система линейных напряжений была практически симметричной. По стандарту симметричной трехфазной системой напряжений считается такая систе-

ма, для которой напряжение обратной последовательности не превышает 1% напряжения прямой последовательности.

При проведении опыта холостого хода трехфазных трансформаторов подводимое напряжение определяют как среднее арифметическое значение трех измерений линейных напряжений, а ток — как среднее арифметическое значение тока трех фаз.

При периодических, типовых и других полных испытаниях измерение тока и потерь холостого хода производят не менее чем в пяти точках в диапазоне напряжений от 80 до 110% номинального, в том числе при номинальном напряжении.

Учет погрешностей измерительных приборов. Для однофазных трансформаторов схемы включения приборов при проведении опыта холостого хода приведены на рис. 2.75, а для трехфазных — на рис. 2.76.

На рис. 2.76, а не показано включение вольтметра и частотомера; они включаются между одной из пар зажимов, как показано на рис. 2.75. Частотомер можно включать через отдельный трансформатор напряжения.

При измерениях потерь холостого хода следует учитывать мощность (Вт), потребляемую измерительными приборами. При измерениях по схемам, изображенным на рис. 2.75, эта мощность равна

$$P_{\text{и}} = \frac{U^2}{R_V} + \frac{U^2}{R_f} + \frac{U^2}{R_c} + \frac{U^2}{R_{\text{и}}},$$

где U — напряжение, подведенное к зажимам приборов, В; R_V — внутреннее сопротивление вольтметра действующих значений, Ом; R_f — внутреннее сопротивление частотомера, Ом; R_c — внутреннее сопротивление вольтметра средних значений, Ом; $R_{\text{и}}$ — внут-

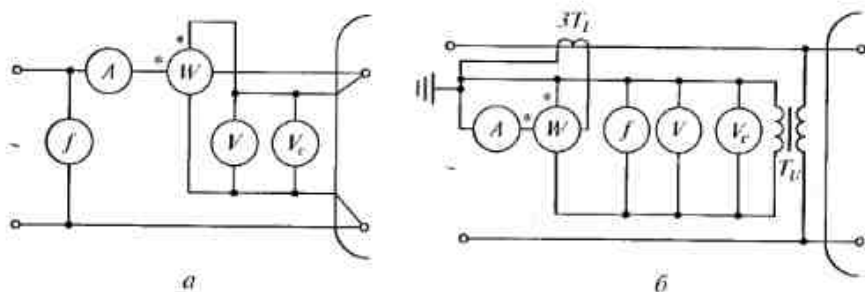


Рис. 2.75. Схемы включения для измерения тока и потерь холостого хода однофазных трансформаторов:

а — при непосредственном включении приборов; б — через измерительные трансформаторы тока и напряжения; V — вольтметр действующих значений; V_c — вольтметр средних значений; T_I — трансформатор тока; T_U — трансформатор напряжения; f — частотомер

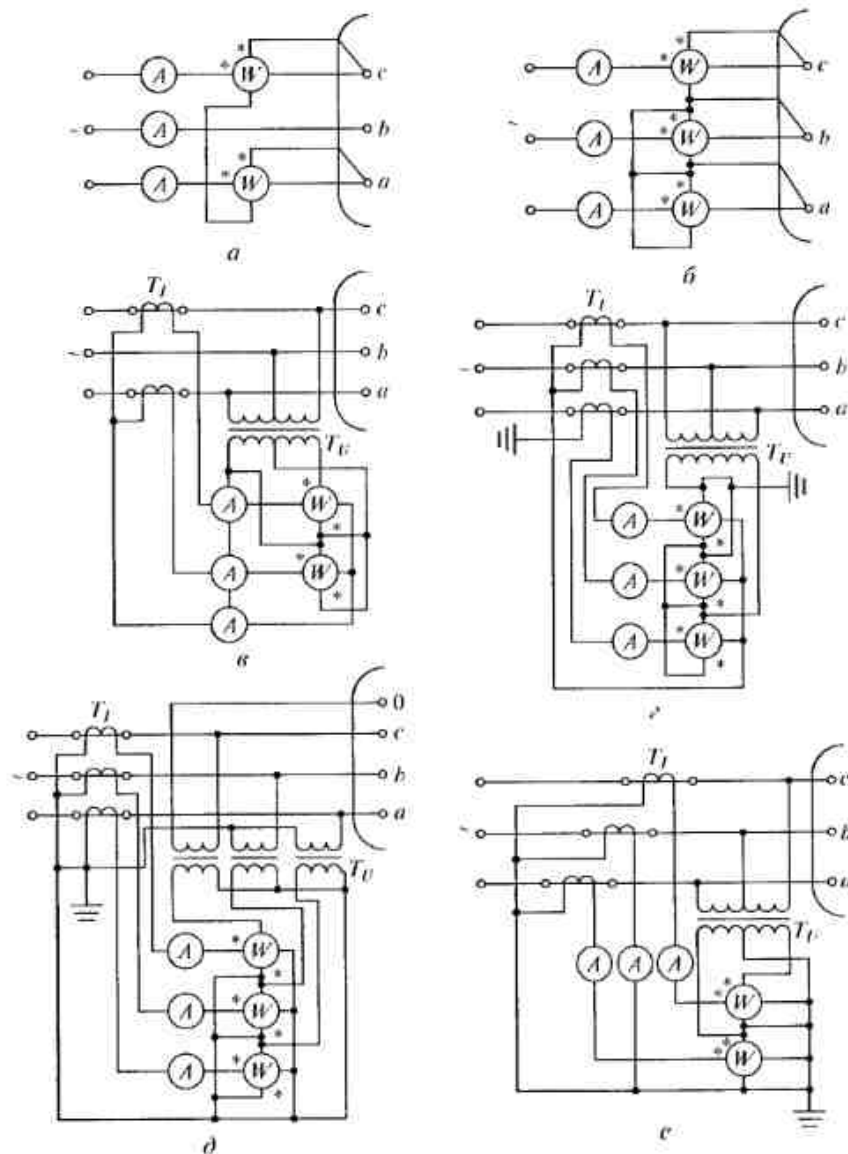


Рис. 2.76. Схемы включения для измерения тока и потерь холостого хода трехфазных трансформаторов с использованием:

а — двух ваттметров; б — трех ваттметров; в — двух ваттметров с измерительными трансформаторами; г — трех ваттметров с измерительными трансформаторами и при наличии у питающего трансформатора выведенного нулевого провода; е — двух ваттметров и трех измерительных трансформаторов тока; А — амперметр; W — ваттметр; T_I — трансформатор тока; T_U — трансформатор напряжения

реинее сопротивление параллельно включенной обмотки ваттметра, Ом.

Потери холостого хода

$$P_0 = P_{11} - P_{12}$$

где P_{11} — потери, полученные по показаниям ваттметра, Вт.

При измерении потерь холостого хода для обеспечения необходимой точности рекомендуется применять измерительные трансформаторы тока и напряжения класса точности не ниже 0,2 — по угловым погрешностям и не ниже 0,5 — по погрешностям измерения тока и напряжения.

Если измерения производят по схемам, приведенным на рис. 2.76, б, з, д, то следует учитывать погрешности измерительных трансформаторов следующим образом. В показания каждого ваттметра вносят поправку (Вт)

$$\Delta\gamma = \pm 0,291 UI\delta \cdot 10^{-3}, \quad (2.140)$$

где U , I — напряжение, В, и ток фазы, А, при испытаниях; δ — результирующая угловая погрешность измерительных трансформаторов, мин.

Результирующую угловую погрешность δ' можно определить как модуль алгебраической разности:

$$\delta' = |\delta_I - \delta_U|,$$

где δ_I , δ_U — угловые погрешности трансформаторов тока и напряжения, мин.

Фактические потери рассчитывают по следующей формуле:

$$P = P' + \Delta\gamma,$$

где P' — значение потерь, вычисленное по показаниям ваттметров.

Знак результирующей поправки ($\Delta\gamma$) можно определить с учетом знака угловой погрешности каждого измерительного трансформатора в соответствии с табл. 2.9.

Таблица 2.9

Знак поправки δ		Знак угловой погрешности измерительного трансформатора	
$\delta_I > \delta_U$	$\delta_I < \delta_U$	напряжения δ_U	тока δ_I
—	+	+	+
+	—	—	—
—	—	+	—
+	+	—	+

При измерениях, проводимых по схеме рис. 2.76, з, определяют поправку (Вт) на показания трех ваттметров

$$\Delta\gamma' = \pm 0,291\sqrt{3} \cdot U_{cp} I_{cp} \delta_{cp} \cdot 10^{-3}, \quad (2.141)$$

где U_{cp} , I_{cp} и δ_{cp} — средние арифметические значения линейных напряжений, токов и угловых погрешностей.

Фактические потери

$$P = P' + \Delta\gamma'. \quad (2.142)$$

Угловые погрешности измеряют при всех возможных нагрузках и значениях первичного тока (напряжения) 20, 40, 60, 80, 100 и 120 % номинального. Затем строят зависимость угловых погрешностей от нагрузки и значения первичного тока (напряжения) для использования этих зависимостей при внесении поправок на измерение потерь.

Проверка при малом подводимом напряжении. Для определения потерь холостого хода при малом напряжении требуется снять остаточное намагничивание магнитной системы трансформатора. Снятие остаточного намагничивания производят однократным плавным увеличением и последующим плавным снижением переменного напряжения (не быстрее чем за 30 с) до значения, равного малому значению напряжению, при котором производят измерения. Остаточное напряжение можно снимать и другим способом — последовательным пропуском (с последующим снижением до значения не более 60 % от начального) по обмоткам трансформатора постоянного тока противоположных полярностей. При этом каждое последующее значение постоянного тока должно быть на 30...40 % ниже предыдущего.

Размагничивание осуществляют пропуском тока по одной из обмоток каждого из стержней магнитной системы. Наибольшее значение МДС постоянного или переменного тока, с которого начинают процесс размагничивания, должно составлять не менее 70 % того значения МДС, которым было произведено намагничивание магнитной системы; подводимое напряжение не должно вызывать возбуждения трансформатора, превышающего номинальное более чем на 20 %.

Наименьшее значение МДС, при которой заканчивается процесс размагничивания, должно быть не более действующего значения МДС, ожидаемой в опыте холостого хода при малом напряжении.

Потери в однофазных трансформаторах можно измерить по схемам, приведенным на рис. 2.77 и 2.78. Измеряют подводимое напряжение U , суммарную мощность P , потребляемую испытываемым трансформатором и измерительными приборами. По схеме,

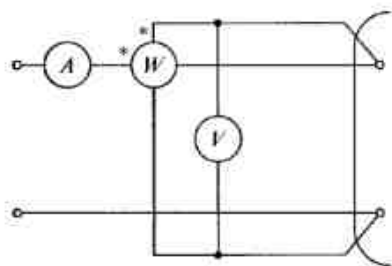


Рис. 2.77. Схема для измерения суммарных потерь холостого хода в однофазных трансформаторах при малом напряжении:

A — амперметр; V — вольтметр; W — ваттметр

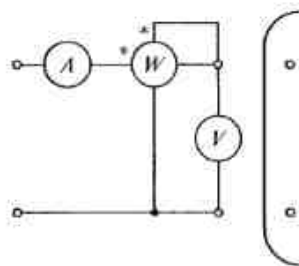


Рис. 2.78. Схема для измерения потерь в измерительных приборах при измерении потерь холостого хода в однофазных трансформаторах при малом напряжении:

A — амперметр; V — вольтметр; W — ваттметр

изображенной на рис. 2.78, определяют мощность $P_{ин}$, потребляемую измерительными приборами.

Для определения потерь холостого хода при малом напряжении трехфазный трансформатор преобразуется в однофазный путем поочередного короткого замыкания одной из его фаз и возбуждения двух других. Для определения потерь холостого хода проводят три опыта: первый — короткое замыкание обмотки фазы A , возбуждение фаз B и C и измерение потерь; второй — короткое замыкание обмотки фазы B , возбуждение фаз A и C и измерение потерь; третий — короткое замыкание обмотки фазы C , возбуждение фаз A и B и измерение потерь. Результаты измерений суммируют и обрабатывают как для однофазных трансформаторов с учетом потерь в измерительных приборах.

Проверка потерь и напряжения короткого замыкания. Для измерения токов, потерь и напряжения короткого замыкания используют схемы, представленные на рис. 2.75 и 2.76 (за исключением того, что включение вольтметров средних значений не требуется). При опыте короткого замыкания трансформатора выполняют короткое замыкание вторичной обмотки, а первичную питают от источника переменного тока номинальной частоты. Если трансформатор не имеет обмоток, соединенных по схеме треугольник, то короткое замыкание обмотки осуществляют соединением ее линейных зажимов между собой и с зажимом нейтрали.

Короткое замыкание обмоток выполняют возможно более короткими проводами, обеспечивая их надежные контактные присоединения к зажимам трансформатора. Плотность тока в подводящих проводах и проводах, используемых для выполнения короткого замыкания обмоток, не должна быть более 1,8 (для медных проводов) и 1,2 А/мм² (для алюминиевых).

При проведении опыта важно правильно выбрать значение тока и ограничить длительность его пропускания. Ток должен находиться в пределах от 0,25 номинального до номинального. Если значение тока, при котором производят опыт, составляет более 40 % номинального, то от момента подачи напряжения до снятия показаний приборов должно пройти не более:

$$\tau = \frac{240}{\delta_1 \delta_2} \text{ — для алюминиевых проводов;}$$

$$\tau = \frac{480}{\delta_1 \delta_2} \text{ — для медных проводов,}$$

где δ_1, δ_2 — плотности токов в обмотках, А/мм². Если это условие не выполняется, следует снизить ток, при котором проводят опыт.

Для трехфазных трансформаторов ток и напряжение при опыте определяют как среднее арифметическое показание приборов всех трех фаз.

Приведение результатов измерений к номинальному току. Потери P_k и напряжение U_k короткого замыкания (% номинального напряжения) при температуре опыта, соответствующие номинальному току обмотки, осуществляют по следующим формулам:

$$P_k = P'_k \left(\frac{I_{ном1}}{I'_k} \right)^2; \quad (2.143)$$

$$U_k = \frac{U'_k I_{ном2}}{U_{ном} I'} 100, \quad (2.144)$$

где P'_k, I'_k — мощность, Вт, и ток, А, полученные из опыта; $I_{ном1}, U_{ном}$ — номинальные значения тока, А, и напряжения, В, на номинальном ответвлении в обмотке наименьшей мощности из обмоток, участвующих в опыте; U'_k — напряжение, при котором проведен опыт, В; $I_{ном2}$ — номинальное значение тока на номинальном ответвлении в обмотке наибольшей мощности (из обмоток, участвующих в опыте), А.

Потери, измеренные при опыте короткого замыкания и приведенные к номинальному току, приводят также к расчетной рабочей температуре T , которая для обмоток с изоляционными материалами классов нагревостойкости A, E и B составляет 75 °С, а для классов F, H и C — 115 °С. Для этого из измеренных и приведенных к номинальному току потерь короткого замыкания первоначально вычитают сумму потерь в обмотках $\sum I_{ном}^2 R$, где R — сопротивление, Ом, измеренное при постоянном токе. Разность потерь $P_{доб} = P_k - \sum I_{ном}^2 R$ принимают за величину добавочных потерь при температуре T . Если температура t обмотки при опыте короткого замыкания отличается от температуры, при которой

производились измерения сопротивления, то потери в обмотках приводят к температуре T обмоток при опыте короткого замыкания. Затем потери $\sum I_{ном}^2 R$ приводят к расчетной рабочей температуре обмотки T по формуле

$$\sum I^2 R_T = \sum I_{ном}^2 R \frac{T+k}{t+k} \quad (2.145)$$

а добавочные потери $P_{доб}$ T пересчитывают с учетом формулы

$$P_{доб} = \frac{P_{добT}}{\frac{T+k}{t+k}} \quad (2.146)$$

где k — температурный коэффициент (для меди $k = 235$, для алюминия $k = 225$). Тогда искомые потери короткого замыкания, приведенные к расчетной рабочей температуре T , равны

$$P_{кT} = \sum I_{ном}^2 R_T + P_{дТ} \quad (2.147)$$

Если добавочные потери в трансформаторе невелики, т. е. считают менее 10 % потерь в обмотках, то для приведения потерь короткого замыкания к расчетной рабочей температуре T используют упрощенную формулу

$$P_{кT} = \frac{P_k(T+k)}{t+k} \quad (2.148)$$

Напряжение короткого замыкания можно привести к расчетной рабочей температуре обмотки с помощью следующего выражения:

$$U_{кT} = \sqrt{[U_{ат}(T+k)(t+k)]^2 + U_{рт}^2} \quad (2.149)$$

где $U_{ат}$, $U_{рт}$ — активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, %, при температуре опыта t , рассчитанные по формулам:

$$U_{ат} = \frac{P_k}{10P_{ном}} \quad (2.150)$$

$$U_{рт} = \sqrt{U_{кт}^2 - U_{ат}^2} \quad (2.151)$$

где $P_{ном}$ — номинальная мощность трансформатора, Вт; $U_{кт}$ — напряжение короткого замыкания, %, соответствующее номинальному току, определенное при температуре t , В.

Если активная составляющая напряжения короткого замыкания не превышает 15 % значения напряжения короткого замыкания $U_{кт}$, то ее не приводят к расчетной рабочей температуре T .

Приведение результатов измерений к номинальной частоте. Опыт короткого замыкания выполняют при номинальной частоте сети (с допуском $\pm 1\%$). Допускается при опыте отклонение частоты сети не более чем на 2 % (f') с последующим пересчетом результатов опыта.

Напряжение короткого замыкания при номинальной частоте

$$U_{кном} = \sqrt{\left(\frac{U'_{рт} f_{ном}}{f'}\right)^2 + U'_{ат}{}^2} \quad (2.152)$$

где $U'_{ат}$, $U'_{рт}$ — активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, %, при частоте f' ; $f_{ном}$ — номинальная частота, Гц.

Пересчет потерь короткого замыкания на номинальную частоту сети не производят. Если $U_{ат} \leq 0,15 U_{кн}$, допустимо приведение напряжения короткого замыкания к номинальной частоте выполнять по формуле

$$U_{кном} = \frac{U_{кт} f_{ном}}{f'}$$

При расчете потерь по результатам измерений учитывают основные потери в проводах, применяемых для выполнения короткого замыкания обмоток, а также потери в подводящих проводах, если они входят в цепь измерений. Эти сопротивления находят расчетным или опытным путем. При необходимости следует вносить также поправки на потери в измерительных приборах и на угловые погрешности измерительных трансформаторов, как это сделано при проверке тока и потерь холостого хода.

Измерение сопротивления нулевой последовательности. Знание сопротивления нулевой последовательности важно для анализа несимметричных режимов работы трансформатора. Сопротивление нулевой последовательности измеряют на полностью собранном трансформаторе (для масляных трансформаторов, кроме того, залитых маслом) при номинальной частоте между соединенными вместе линейными зажимами обмоток (для трехфазного трансформатора, при соединении обмоток по схеме звезда или треугольник) и выведенным наружу зажимом нейтрали.

Сопротивление нулевой последовательности Z_0 , приходящееся на одну фазу, определяют по результатам измерений

$$Z_0 = \frac{3U}{I}$$

где U — подведенное напряжение, В; I — измеренное значение тока, А.

Если в трансформаторе имеется обмотка, соединенная по схеме треугольник, то при измерении сопротивления нулевой последовательности это соединение должно быть сохранено. В трансформаторах с несколькими ответвлениями обмоток сопротивление нулевой последовательности измеряют на номинальном ответвлении.

Автотрансформаторы с заземляемой нейтралью рассматривают как обычные трансформаторы. При этом последовательная и общая обмотки образуют одну измерительную цепь, а общая обмотка — другую. При испытаниях двухобмоточных трансформаторов с обмотками, соединенными по схеме звезда—звезда, приложенное при измерении напряжение не должно превышать напряжения между линией и нейтралью при нормальной работе трансформатора.

Токи и длительность их пропускания при измерении сопротивления нулевой последовательности обычно определяют при составлении программы испытаний, учитывая, что ток при испытании не должен превышать расчетного значения тока нейтрали, а при испытании автотрансформатора — расчетного значения тока соответствующих обмоток; причем длительность испытания ограничена, чтобы исключить возможный высокий нагрев металлических частей трансформатора.

Определение параметров изоляции. К параметрам изоляции относятся: сопротивление изоляции, тангенс угла диэлектрических потерь и емкость изоляции, определяемые при температуре изоляции не ниже 10 °С. Для сухих и масляных трансформаторов всех классов напряжения, подвергавшихся подогреву или не остывших после отключения, а также для трансформаторов, находящихся на открытом воздухе, за температуру изоляции условно принимают температуру обмоток, измеренную по ее активному сопротивлению. Для масляных трансформаторов класса напряжения 35 кВ и ниже, находящихся внутри помещения, длительно отключенных и не подвергавшихся подогреву, за температуру изоляции принимают температуру верхних слоев масла. Измерять параметры изоляции следует не ранее чем через 1 ч при нагреве током короткого замыкания или постоянным током и не ранее чем через 0,5 ч при внешнем нагреве (индукционным методом).

Определение сопротивления изоляции. Сопротивление изоляции измеряют мегаомметром на напряжение 2,5 кВ. Для сравнительно небольших трансформаторов с напряжением на высокой стороне до 35 кВ и мощностью до 16 МВ·А можно применять мегаомметры на 1 кВ.

Перед началом измерения испытываемую обмотку заземляют не менее чем на 120 с. При измерении сопротивления изоляции следует использовать такую схему измерения, при которой общее сопротивление изоляции элементов схемы могло быть измерено

Таблица 2.10

Двухобмоточные трансформаторы и трехобмоточные автотрансформаторы	Трехобмоточные трансформаторы		Трансформаторы с расщепленной обмоткой НН	
	Обмотки, на которых производят измерения	Обмотки, на которых производят измерения	Обмотки, на которых производят измерения	Заземляемые части трансформатора
НН	Заземляемые части трансформатора	Обмотки, на которых производят измерения	Заземляемые части трансформатора	Заземляемые части трансформатора
ВН	Заземляемые части трансформатора	Обмотки, на которых производят измерения	Заземляемые части трансформатора	Заземляемые части трансформатора
(ВН + НН)	Заземляемые части трансформатора	Обмотки, на которых производят измерения	Заземляемые части трансформатора	Заземляемые части трансформатора
		(ВН + СН)	Бак, НН	(ВН + НН ₁₍₂₎)
		(ВН + СН + НН)	Бак	(ВН + НН ₁ + НН ₂)
				Бак

Примечание. ВН — обмотка высшего напряжения; СН — обмотка среднего напряжения; НН — обмотка низшего напряжения; НН₁, НН₂ — части расщепленной обмотки НН.

по полной шкале применяемого мегаомметра. Если это условие невыполнимо, вносят поправку в результаты измерения. Для этого находят общее сопротивление изоляции элементов схемы при напряжении, соответствующем напряжению мегаомметра. Поправку рассчитывают по следующей формуле:

$$R = \frac{R'}{1 - \frac{R'}{R''}}, \quad (2.153)$$

где R — сопротивление изоляции трансформатора, Ом; R' — общее сопротивление цепи проводов и изоляции трансформатора, измеренное мегаомметром, Ом; R'' — сопротивление проводов, Ом.

Сопротивление изоляции обмоток трансформатора принято измерять в последовательности и по правилам, указанным в табл. 2.10.

Отсчеты сопротивления изоляции следует производить дважды через 15 и 60 с после появления напряжения на испытываемом объекте.

Тангенс угла диэлектрических потерь и емкость обмоток. Эти параметры определяют с помощью измерительного моста переменного тока по одной из схем, приведенных на рис. 2.79. Измерения проводят при питании измерительного моста от источника переменного тока частоты 50 Гц с допускаемым отклонением по частоте в пределах $\pm 2\%$, а для масляных трансформаторов при напряжении, не превышающем 60% испытательного напряжения обмотки. Обычно измерения выполняют при напряжении 10 кВ. При измерениях по схеме, представленной на рис. 2.79, в, результаты измерения корректируются:

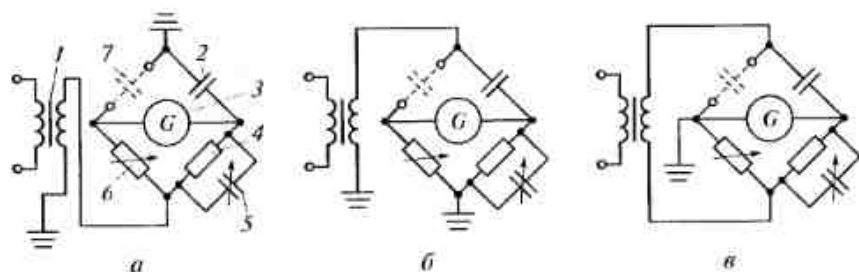


Рис. 2.79. Схемы для измерения тангенса угла диэлектрических потерь и емкости обмоток:

a — перевернутая; *б* — нормальная; *в* — с заземленной нейтралью; 1 — трансформатор питания; 2 — конденсатор обрывной; 3 — гальванометр; 4 — резистор; 5 — конденсатор регулируемый; 6 — резистор регулируемый; 7 — испытываемый объект

$$C = C' - C_{\text{ном}}; \quad (2.154)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C' \operatorname{tg} \delta'}{C} - \frac{C_{\text{ном}} \operatorname{tg} \delta_{\text{ном}}}{C}, \quad (2.155)$$

где C — емкость обмоток испытываемого трансформатора, мкФ; C' — емкость, измеренная при подключении объекта к схеме моста, мкФ; $C_{\text{ном}}$ — емкость, измеренная при отключенном объекте, мкФ; $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь изоляции испытываемого трансформатора; $\operatorname{tg} \delta'$ — тангенс угла диэлектрических потерь, измеренный при подключении объекта к схеме моста; $\operatorname{tg} \delta_{\text{ном}}$ — тангенс угла диэлектрических потерь, измеренный при отключении объекта от схемы моста.

Тангенс угла диэлектрических потерь и емкость измеряют в соответствии с табл. 2.10. Определение относительного прироста емкости проводят двумя методами емкость — частота или емкость — время. В обоих случаях относительный прирост емкости при изменении частоты или длительности разряда находят путем заряда и разряда емкости с помощью специальных приборов. В обоих случаях испытания проводят в соответствии с табл. 2.10. При использовании первого метода периодический заряд и разряд емкости производят при двух частотах (например, 50 и 2 Гц или 50 и 0,3 Гц), а при использовании второго метода осуществляют однократный заряд и разряд емкости при двух значениях длительности разряда (например, 0,02 и 1 с).

Испытания трансформатора на нагрев. Методы испытаний трансформатора на нагрев как невращающейся электрической машины имеют некоторые особенности. При испытаниях определяют превышение температуры обмоток и магнитной системы, а для масляных трансформаторов и верхних слоев масла над температурой охлаждающей среды при номинальных условиях по нагреву и охлаждению. Для трансформаторов большой номинальной мощности (для трехфазных — свыше 125 МВ·А, а для однофазных — свыше 63 МВ·А) определяют также температуру частей остова и бака.

При испытаниях на нагрев за номинальные условия по нагреву принимают те, при которых основные потери в токоведущих частях и добавочные потери, обусловленные потоками рассеяния, равны нормированным потерям короткого замыкания $P_{\text{к.ном}}$, а потери в магнитной системе — нормированным потерям холостого хода $P_{\text{0ном}}$.

Превышение температуры обмоток обычно измеряют при номинальном токе, однако в случае необходимости допускается проводить испытания при меньшем токе, но не менее 90% номинального. Условия охлаждения, соответствующие номинальному режиму работы трансформатора, считаются номинальными. Транс-

форматор при испытании не должен подвергаться охлаждению быстрыми потоками воздуха, воздействию тепловой радиации или каких-либо внешних возмущений, влияющих на результаты испытаний на нагревание. В трансформаторах с масляно-водяным охлаждением температура воды на входе в охладитель поддерживаться должна 5...33 °С.

При испытании трансформаторов на нагрев используют один из следующих методов: непосредственной нагрузки, взаимной нагрузки или короткого замыкания и холостого хода (для масляных трансформаторов).

Метод непосредственной нагрузки. К испытываемому трансформатору подводят номинальное напряжение и устанавливают в его обмотках необходимый ток, который измеряют на стороне нагрузки.

При испытаниях рекомендуется измерять через равные промежутки времени (но не более чем через 1 ч): ток, напряжение, температуру верхних слоев масла, магнитопровода и охлаждающей среды и средней температуры обмоток. Время выполнения последних измерений должно быть выбрано так, чтобы температура верхних слоев масла не изменялась за 1 ч более чем на 1,5 °С и чтобы продолжительность испытательного режима до выполнения последних измерений не была меньше учетверенного значения постоянной времени нагрева трансформатора.

Установившееся превышение температуры (°С) какой-либо части трансформатора ($\Delta\theta_j$) над эквивалентной температурой охлаждающей среды определяется выражением

$$\Delta\theta_j = \theta_j - \theta_{\text{ср}}, \quad (2.156)$$

где θ_j — среднее арифметическое значение температуры, вычисленное по результатам измерений в последний час испытательного режима, °С; $\theta_{\text{ср}}$ — эквивалентная температура охлаждающей среды, °С,

$$\theta_{\text{ср}} = \theta_{\text{к}} - \delta, \quad (2.157)$$

где $\theta_{\text{к}}$ — конечная температура охлаждающей среды, измеренная в конце испытательного режима, °С; δ — поправка на постоянную времени трансформатора, учитывающая запаздывание по времени изменения температуры масла по отношению к изменению температуры охлаждающей среды, °С.

Поправка рассчитывается по следующей формуле:

$$\delta = \frac{T(e^{\frac{\Delta t}{T}} - 1) \sum_{j=1}^p \Delta\theta_j e^{\frac{(p+1-j)\Delta t}{T}}}{\Delta t}, \quad (2.158)$$

где T — постоянная времени нагрева трансформатора, с; Δt — интервал времени между последующим и предыдущим измерени-

ями охлаждающей среды, с; $\Delta\theta_j$ — алгебраическая разность между последующими и предыдущими результатами измерений температуры охлаждающей среды, °С; j — порядковый номер измерения, начиная со второго измерения на первом интервале; p — порядковый номер последнего измерения.

Для сокращения времени испытаний иногда вначале форсируют нагрев трансформатора; в этом случае за начало испытаний ($\tau = 0$) принимают момент времени, когда в трансформаторе установлены ток и условия охлаждения, соответствующие заданному испытательному режиму.

Если требуется определить установившееся превышение температуры какой-либо части трансформатора θ_j над температурой средних слоев масла $\theta_{\text{ср}}$, вычисленной как среднее арифметическое значение температуры по результатам измерений в последний час измерений, то используют формулу

$$\Delta\theta_j = \theta_j - \theta_{\text{ср}}. \quad (2.159)$$

Метод взаимной нагрузки. При использовании трансформатора на нагрев методом взаимной нагрузки испытываемый трансформатор 1 соединяют параллельно со вспомогательным трансформатором 2 примерно той же мощности и с тем же номинальным напряжением (рис. 2.80). Группы соединения обоих трансформаторов должны быть одинаковыми. В контур обмоток ВН и НН включают дополнительный трансформатор 3, мощность которого должна быть не менее мощности испытываемого трансформатора, умноженной на коэффициент, равный удвоенному значению напряжения короткого замыкания (%); его напряжение и допустимый ток обмоток должны соответствовать параметрам контура, показанного на рис. 2.80.

Испытание проводится следующим образом. К испытываемому трансформатору 1 подводят номинальное напряжение. К трансформатору 3 подают напряжение, которое регулируют до установления в обмотках испытываемого трансформатора 1 номиналь-

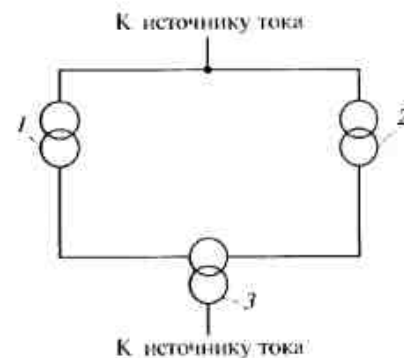


Рис. 2.80. Схема испытания трансформатора методом взаимной нагрузки:

- 1 — испытываемый трансформатор;
- 2 — вспомогательный трансформатор;
- 3 — дополнительный трансформатор

ного тока. Для исключения влияния биений тока на показания приборов частота источника, питающего трансформатор 3, должна отличаться на 2...4 Гц от частоты источника, к которому подключен трансформатор 1.

Если трансформатор или автотрансформатор имеют большое количество ответвлений, допустимо не вводить в контур обмоток трансформатор 3, а включить обмотки на разные ответвления для создания необходимого циркулирующего тока.

Метод короткого замыкания и холостого хода. При использовании этого метода одну из обмоток трансформатора замыкают накоротко, а остальные — оставляют разомкнутыми. К одной из разомкнутых обмоток подводят напряжение, частота которого не отличается от номинальной более чем на 2%, и регулируют его таким образом, чтобы в обмотках установился ток, при котором потери равны $P_{\text{х,ном}} + P_{\text{0ном}}$.

Для определения превышения температуры магнитной системы проводят опыт холостого хода. В этом опыте контролируют подводимое напряжение, частоту и потери. Напряжение должно быть таким, при котором потери $P_{\text{0ном}}$ равны нормированным. Нагрев магнитопровода измеряют в установившемся тепловом режиме. Превышение температуры поверхности магнитопровода над температурой охлаждающей среды рассчитывают по формуле

$$\Delta\theta_{\text{мш}} = \theta'_{\text{мш}} + \theta'_v + \Delta\theta_{\text{в}}, \quad (2.160)$$

где $\theta'_{\text{мш}}$, θ'_v — соответственно температуры частей магнитопровода и верхних слоев масла, измеренные при опыте, °C; $\Delta\theta_{\text{в}}$ — превышение температуры верхних слоев масла над температурой охлаждающей среды, °C.

При испытании на нагрев одним из перечисленных методов очень важно правильно измерять температуры. Измерения температур следует проводить до достижения установившейся температуры масла (для масляных трансформаторов) и магнитопровода (для сухих трансформаторов). Температуру считают установившейся, если превышение температуры верхних слоев масла или магнитопровода над температурой охлаждающей среды (или верхних слоев масла) изменится не более чем на ± 1 °C в течение 3 ч. Если требуется измерить температуру в разных точках трансформаторов, можно воспользоваться терморезисторами или равноценными по точности термометрами или другими термодатчиками.

При определении средней температуры обмотки по ее сопротивлению, измеряемому непосредственно после отключения, одновременно с отключением трансформатора от источника питания останавливают работу вентиляторов или циркуляцию воды. Сопротивление обмоток при испытаниях на нагрев измеряют одним из указанных ранее методов. Первое измерение проводят обыч-

но через 60...120 с после отключения трансформатора, за это время обмотка не успевает заметно остыть.

При измерении сопротивления обмоток, обладающих большой постоянной времени установления тока в измерительной цепи, рекомендуется делать поправку на время установления тока в этой цепи. Для этого при измерении сопротивления обмотки в холодном состоянии отмечают время от момента замыкания измерительной цепи до момента снятия показаний с приборов t_i . Интервалы времени между последовательными измерениями рекомендуется выбирать примерно одинаковыми и равными 20...40 с. Затем находят разности t_i между каждым из измеренных сопротивлений и фактическим сопротивлением, измеренным, когда значение тока в измерительной цепи считают установившимся r' . По результатам (разностей сопротивлений, получаемых при снятии отсчетов в различные моменты времени) строят графическую зависимость (рис. 2.81). В измеренные значения сопротивлений той же обмотки в «горячем» состоянии вносят поправку, используя полученную графическую зависимость.

Для ускорения испытаний на нагрев допускается в начале испытаний установить в обмотках увеличенный ток, но не более 150% номинального тока $I_{\text{ном}}$ трансформатора (в течение 2...3 ч для масляных трансформаторов и в течение 1 ч для сухих). Можно также искусственно ухудшить условия охлаждения. По достижении 70% ожидаемого конечного превышения температуры устанавливают нормальные условия охлаждения и номинальный режим.

Если условия испытания сухих трансформаторов отличаются от номинальных, то результаты испытаний обмоток на нагрев приводят к номинальным условиям по следующей формуле:

$$\Delta\theta_{\text{ном}} = \Delta\theta_{\text{исп}} \left(\frac{I_{\text{ном}}}{I'} \right)^q, \quad (2.161)$$

где $\Delta\theta_{\text{ном}}$ — превышение температуры обмотки при номинальных условиях, °C; $\Delta\theta_{\text{исп}}$ — превышение температуры обмотки, определенное по результатам измерения, °C; I' — ток при испытаниях; q — показатель степени.

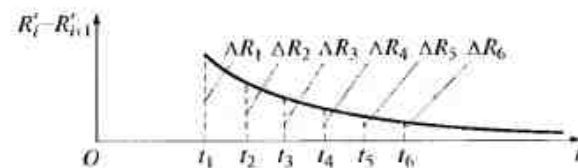


Рис. 2.81. Определение поправки к измерению сопротивления обмотки трансформатора графическим методом

Для трансформаторов с естественным охлаждением $q = 1,6$, для трансформаторов с дутьевым охлаждением — $q = 1,8$.

Испытания бака на плотность. Проверка плотности бака трансформатора на плотность — ответственная часть программы испытаний. Испытания на плотность проводят избыточным давлением одним из следующих способов: 1) столбом масла (у трансформатора, заполненного маслом); 2) давлением сухого воздуха или азота, нагнетаемого под крышку трансформатора, залитого маслом; 3) давлением сухого воздуха или азота, нагнетаемого под крышку трансформатора, не залитого маслом; 4) подкачкой масла в бак трансформатора, герметичного и не залитого маслом.

Для испытания первым способом на крышке или на расширителе трансформатора устанавливают трубу, нижний конец которой соединяют с полостью бака, а верхний (открытый) — заполняют маслом до соответствующего, оговоренного в стандартах уровня.

Для испытания трансформатора давлением сухого воздуха или азота подвод его осуществляют к местам, расположенным выше уровня масла в трансформаторе. Значение давления, продолжительность испытания и температура масла обычно устанавливают в соответствующих стандартах или технических условиях.

Трансформатор считается выдержавшим испытания, если не обнаружено течей масла или первоначально установленное давление не упало ниже допустимого соответствующими стандартами или техническими условиями.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип работы однофазного трансформатора?
2. Перечислите основные элементы конструкции силовых трансформаторов.
3. В чем заключается принцип работы трехфазного трансформатора и как соединены его обмотки?
4. Какой метод используют при анализе несимметричных режимов работы трехфазного трансформатора?
5. Какие условия необходимо соблюдать для возможности параллельной работы трехфазных трансформаторов?
6. Поясните принцип работы автотрансформатора.
7. Когда возникают переходные процессы в трансформаторах и как защитить трансформаторы от перенапряжений при этих процессах?
8. В чем разница в программах периодических и приемосдаточных испытаний трансформаторов и какие испытания включают в себя эти программы?

ГЛАВА 3

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

3.1. Конструкция основных частей машин переменного тока

Статор и ротор электрической машины, состоящие из сердечников и обмоток, называют *активными частями машины*. Все остальные элементы машины (станина, подшипниковые щиты, вал, подшипники, вентилятор и т.п.) — ее *конструктивные части*. Активные части статоров синхронных и асинхронных машин имеют одинаковую конструкцию.

Сердечники являются частями магнитопровода машины, по которому замыкается переменный магнитный поток. Как правило магнитопровод изготавливают шихтованным, т.е. набирают из тонких листов изотропной холоднокатаной электротехнической стали марок 2013 (для машин малой мощности), 2212, 2312, 2411 и других, предусмотренных ГОСТ 21427.2—83.

На внутренней поверхности сердечников статоров расположены пазы трансцидальной или овальной (для машин малой и средней мощности) и прямоугольной формы (для машин большой мощности). В пазы, дно и стенки которых покрыты изоляционным материалом (например, миканитом, пленкостеклопластом, лакотканеслододпластом и др.), уложены обмотки. Обмотки статора асинхронных двигателей бывают однослойные внешние из проводов круглого сечения (для машин с высотами осей вращения до 160 мм) и двухслойные. В двухслойных обмотках верхний и нижний слой изолированы друг от друга (стеклотекстолитом или лакотканеслододпластом).

В машинах большой мощности для придания катушкам большей механической прочности и лучшего заполнения пазов используют проводники прямоугольного сечения. В машинах мощностью свыше 100 кВт с номинальным напряжением до 660 В применяют обмотки из полужестких катушек. Пазовая изоляция такой обмотки имеет конструкцию, аналогичную внешней обмотке, т.е. в ней изолированы не катушки, а пазы машины. Во всех машинах с напряжением 3 кВ и выше обмотку выполняют из жестких катушек. При этом изоляция обмоток должна быть непрерывной или гильзовой. Статорные обмотки асинхронных и синхронных машин мощностью в несколько тысяч киловатт, а также мощных синх-

ронных турбо- и гидрогенераторов обычно выполняют как стержневые. Отдельным элементом такой обмотки является стержень, представляющий собой как бы половину катушки; т. е. состоит из одной пазовой части и двух половин лобовых частей. Стержни укладываются в пазы и затем соединяются между собой в лобовых частях, образуя витки обмотки. В обмотках статоров машин переменного тока протекают токи промышленной частоты, поэтому для уменьшения потерь на вихревые токи стержни выполняют не из массивных медных шин, а из большого числа изолированных между собой параллельных проводников, которые называют элементарными.

Активные части роторов машин переменного тока отличаются между собой. Различают два исполнения ротора асинхронной машины: короткозамкнутый и фазный.

Листы роторов асинхронных двигателей штампуют одновременно с листами статора. На внешней поверхности сердечников расположены пазы. Конфигурация пазов ротора зависит от типа и мощности машины. В машинах малой мощности пазы овальные (полузакрытые или закрытые). В машинах средней и большой мощности в зависимости от исполнения ротора пазы бывают овальные, бутылочные или прямоугольные (полуоткрытые и открытые). Кроме того, в машинах средней и большой мощности для повышения эффекта охлаждения и снижения махового момента в роторе используют аксиальные вентиляционные каналы.

В асинхронных машинах (с высотой оси вращения до 355 мм) обмотки ротора короткозамкнутые, изготовленные путем заливки пазов собранного сердечника алюминием марки А5 или для двигателей с повышенным скольжением — сплавом АКМР-4. Одновременно с обмоткой отливают короткозамыкающие кольца с вентиляционными лопатками (или без них) и расположенными между лопатками штырями, на которых крепят балансировочные грузы.

В асинхронных двигателях с фазным ротором обмотки ротора бывают однослойные выпяные из круглого провода (для машин с высотами осей вращения до 225 мм) или двухслойные волновые из провода прямоугольного поперечного сечения. Проводники в пазах роторов и статоров укрепляют с помощью клиньев, а на роторах также и с помощью бандажей из стеклянной сетчатой ленты, наматанные на лобовые (выходящие из пазов сердечника) части обмотки (или в нескольких местах вдоль сердечника ротора).

Для токоподвода к обмотке вращающегося ротора (кроме короткозамкнутых асинхронных двигателей) на валу располагают контактные кольца. Токосъем с колец осуществляется через графитовые или меднографитовые щетки, установленные в щеткодержателях.

В синхронных машинах на роторе расположены полюсы с обмотками возбуждения.

Станины машин переменного тока в основном изготовляют чугуном литьем. В малых асинхронных машинах применяют также станины из алюминиевых сплавов, образуемые обливкой сердечника статора в машинах для литья под давлением. В крупных машинах кроме чугуна используют также сварные станины из стального проката. На станине расположено выводное устройство, состоящее из закрытой коробки выводов с расположенными в ней доской зажимов или изоляторами.

Подшипниковые щиты изготовляют либо чугуном литьем, либо сварными из стального проката. Для малых машин для этих же целей применяют литье под давлением из алюминиевых сплавов. В центральной части подшипниковых щитов предусмотрена втулка со сквозной проточкой для посадки шариковых или роликовых подшипников качения. В машинах мощностью более 1 000 кВт применяют также подшипники скольжения. В подшипниковых щитах машин средней и большой мощности может быть предусмотрено устройство для пополнения и частичной замены консистентной смазки без разборки машин.

Несмотря на конструктивную разницу и принципы действия машин переменного тока в них происходит одни и те же физические процессы, в основе их теории лежит ряд общих положений, касающихся наведения в обмотке ЭДС, образования и расчета магнитного поля машины, расчета индуктивностей, определения потерь машины и ряд других вопросов. Для работы машин переменного тока необходимо вращающееся магнитное поле, которое создается при протекании трехфазного (или двухфазного) переменного тока по трехфазной (двухфазной) обмотке.

3.2. Устройство многофазных обмоток

Обмотка электрической машины должна создавать требуемую для работы машины ЭДС и обеспечивать необходимое для преобразования энергии магнитное поле.

Простейшим элементом обмотки является виток, который состоит из двух проводников, размещенных в пазах, находящихся на расстоянии y друг от друга. Это расстояние называют *шагом обмотки*. Шаг обмотки может быть выражен в единицах длины или в числе пазов. Его сравнивают с полюсным делением τ (длиной дуги, соответствующей одному полюсу). При $y = \tau$ шаг обмотки называют диаметральной, или полным, при $y < \tau$ — укороченным, при $y > \tau$ — удлинённым.

Обмотки с полным шагом чаще выполняют как однослойные (когда в пазу размещена одна сторона катушки), а обмотки с укороченным шагом — как двухслойные (в пазу размещены две стороны разных катушек — одна над другой).

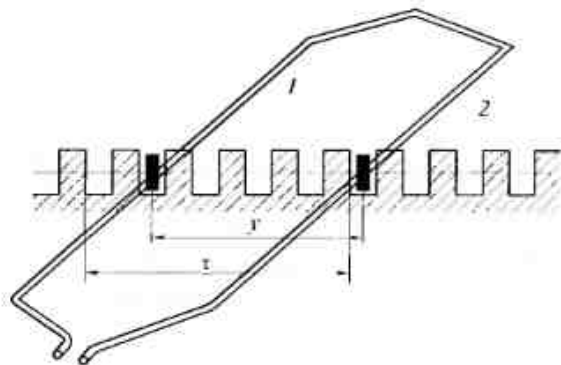


Рис. 3.1. Виток катушки, образующийся при последовательном соединении проводников 1 и 2

Витки, имеющие общую изоляцию, соединяют между собой, при этом образуется ряд катушек (рис. 3.1). Расположенные в пазах катушки, соединенные последовательно и относящиеся к одной фазе и паре полюсов p , образуют катушечную группу.

Стороны катушек одной катушечной группы занимают q пазов

$$q = \frac{z}{2pm} \quad (3.1)$$

и образуют фазную зону с углом $\alpha = \frac{2\pi pq}{z}$.

Каждая фаза обмотки состоит из нескольких соединенных последовательно или параллельно катушечных групп.

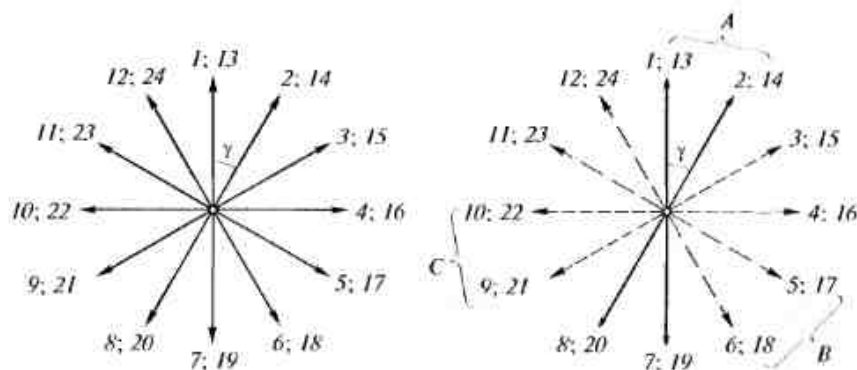


Рис. 3.2. Звезда пазовых ЭДС ($Z = 24$; $2p = 4$; $\alpha = 30^\circ$)

Рис. 3.3. Распределение векторов пазовых ЭДС между тремя фазами обмотки

Очевидно, что число проводников, укладываемых в пазы, всегда четное. В многофазных обмотках проводники разбивают на одинаковые группы по числу фаз, симметрично расположенные в пазовом слое. Каждая фаза образует отдельную электрическую цепь обмотки. Поскольку в машинах переменного тока индукция изменяется вдоль окружности воздушного зазора обычно по закону, близкому к синусоидальному, при относительном движении проводников в магнитном поле в них наводятся практически синусоидальные ЭДС, которые могут быть представлены в виде векторов. Если обмотка переменного тока машины, имеющей $2p$ полюсов, размещена в z пазах, то ЭДС, наводимые в проводниках, расположенных в соседних пазах, сдвинуты по фазе на угол $\gamma =$

$\frac{2\pi p}{z}$. Таким образом, звезда пазовых векторов ЭДС должна состоять из z лучей, сдвинутых между собой на угол γ (рис. 3.2).

Если машина имеет m фаз, то вектора звезды должны быть разбиты на m симметричных групп, сдвинутых между собой на угол, соответствующий числу фаз системы.

В трехфазной машине звезда пазовых векторов разбивается (рис. 3.3) на три равные части, состоящие из двух групп векторов, которые сдвинуты между собой на 180° . Каждый виток соответствует двум векторам ЭДС, сдвинутым на угол, равный или близкий к 180° . Как видно на рис. 3.3, фаза A состоит из восьми проводников: 1, 2, 7, 8, 13, 14, 19 и 20, образующих четыре витка. Аналогично образуются фаза B из проводников 5, 6, 11,

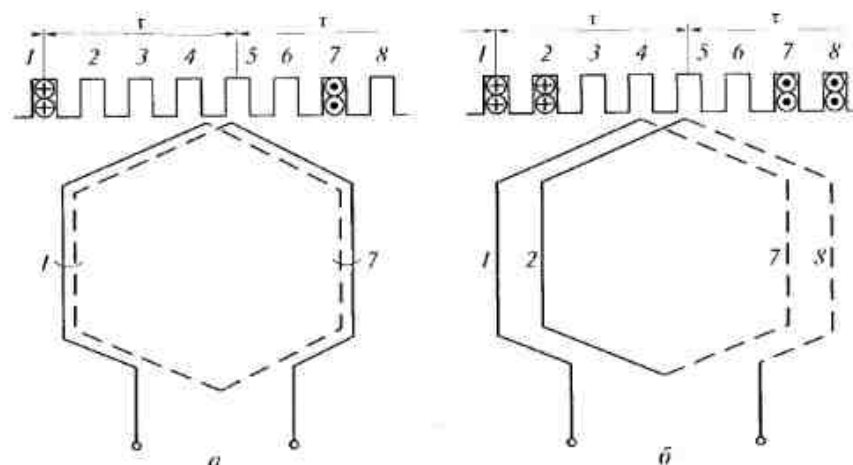


Рис. 3.4. ЭДС катушечной группы:

a — сосредоточенной обмотки; b — распределенной обмотки; 1...8 — пазы

12, 17, 18, 23 и 24 и фаза С из проводников 9, 10, 3, 4, 21, 22, 15 и 16.

При больших значениях фазного тока (или по условиям переключения) обмотка может иметь несколько параллельных ветвей. Основным условием для возможности образования параллельных ветвей в фазе является равенство суммарных ЭДС, действующих в этих ветвях, и равенство их сопротивлений. Так, например, на рис. 3.3 звезда векторов фазовых ЭДС состоит из сдвинутых векторов, поэтому проводники 1, 2, 7, 8 могут образовывать одну ветвь, а проводники 13, 14, 19, 20 — другую. Возможен и другой вариант, когда в одну ветвь входят проводники 1, 8, 13, 20, а в другую — 2, 7, 14, 19.

В трехфазной обмотке на одном полюсном делении расположено $3q$ пазов. При $q = 1$ под каждым полюсом расположено только по одной катушке каждой фазы. Такую обмотку называют сосредоточенной (рис. 3.4, а), при $q > 1$ обмотку называют распределенной (рис. 3.4, б).

3.3. ЭДС, наводимая в обмотках машин переменного тока

ЭДС в проводнике. Характер изменения во времени ЭДС, индуцируемой в проводнике или, другими словами, форма кривой ЭДС определяется видом кривой распределения магнитной индукции в воздушном зазоре электрической машины. При перемещении проводника в магнитном поле Φ , в нем наводится ЭДС $E_{\text{пр}}$. Как известно из теории переменных токов, среднее значение ЭДС, индуцируемой в проводнике, не зависит от формы ее кривой и, следовательно, от вида кривой распределения магнитной индукции в зазоре, т.е.

$$E_{\text{ср.пр}} = 2 \frac{pn}{60} \Phi, \quad (3.2)$$

где p — число пар полюсов; n — скорость вращения проводника в магнитном поле.

Поскольку

$$\frac{pn}{60} = f,$$

то

$$E_{\text{ср.пр}} = 2 \frac{pn}{60} \Phi = 2f\Phi. \quad (3.3)$$

Действующее значение ЭДС в проводнике ($E_{\text{пр}}$) для синусоидальных кривых

$$E_{\text{пр}} = 2,22f\Phi. \quad (3.4)$$

В общем случае кривая индукции и, следовательно, кривая ЭДС в проводнике несинусоидальны. Тогда кривую индукции разлагают в ряд гармонических составляющих и определяют ЭДС, создаваемые каждой гармонической индукцией, отдельно. Получают ряд гармонических ЭДС, после чего находят $E_{\text{пр}}$. Первую гармоническую ряда обычно называют основной, остальные — высшими.

Действующее значение наведенной ЭДС при наличии несинусоидально распределенного поля и частотах высших гармонических, отличных от частоты первой гармонической ($f_v \neq f_1$), рассчитывают по формуле

$$E_{\text{пр}} = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \dots}. \quad (3.5)$$

Пусть кривая индукции имеет вид, показанный на рис. 3.5. Из математического анализа известно, что такая кривая содержит только нечетные гармонические.

Кривая индукции представляет собой функцию не времени, а расстояния (см. рис. 3.5), на котором находится заданная точка от точки, принятой начальной (например, точка А). Такой ряд гармонических называют *пространственным*, а составляющие его гармонические — *пространственными гармоническими*.

Гармонические ЭДС или тока, представляющие собой функцию времени, называют *временными гармоническими*.

Расчеты показывают, что высшие гармонические индукции, даже если они выражены достаточно сильно, относительно мало влияют на величину МДС в проводнике.

ЭДС витка. При вращении в синусоидальном магнитном поле витка, состоящего из двух последовательно соединенных проводников 1 и 2, расположенных на расстоянии удруг от друга (рис. 3.6), ЭДС, наведенная в витке, равна геометрической разности ЭДС $E_{\text{пр}1}$ и $E_{\text{пр}2}$, сдвинутых между собой на некоторый угол. Если шаг

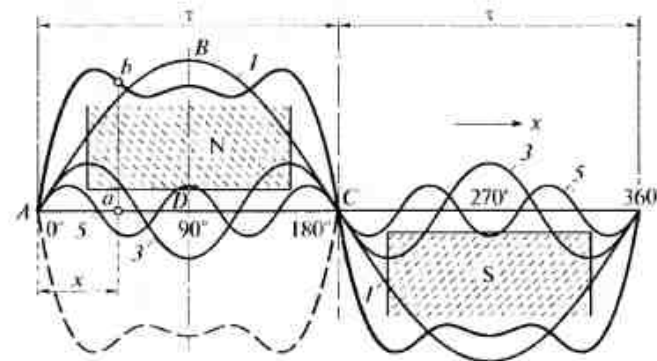


Рис. 3.5. Разложение кривой индукции в ряд гармонических (1, 3, 5)

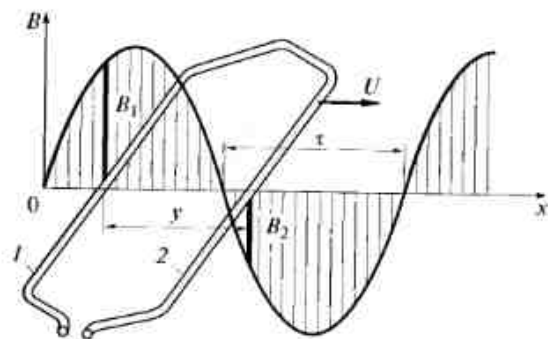


Рис. 3.6. Процесс наведения ЭДС в витках при относительном движении проводника в синусоидальном магнитном поле:

1, 2 — последовательно соединенные проводники

полный, то E_{np1} и E_{np2} изображаются двумя векторами, равными по величине и находящимися в противофазе (рис. 3.7). В этом случае действующее значение ЭДС витка

$$E_n = 2E_{np} \quad (3.6)$$

При укорочении шага витка проводник 2 расположен со сдвигом относительно середины полюса на $\tau - y$. Для первой гармонической этот сдвиг соответствует углу

$$\beta_1 = \frac{\pi(\tau - y)}{\tau} \quad (3.7)$$

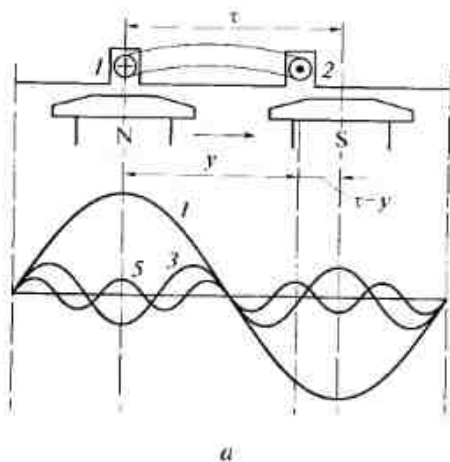


Рис. 3.8. ЭДС витка при $y < \tau$:

a — ЭДС витка и ее гармонические (1, 3, 5) составляющие; б и в — сложенные векторы ЭДС для основной и v -й гармонических; 1, 2 — проводники

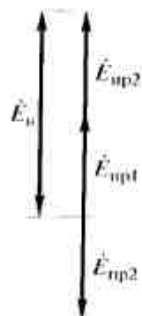


Рис. 3.7. ЭДС витка при $y = \tau$

В этом случае вектор ЭДС E_{np2} сдвинут относительно его положения, изображенного на рис. 3.7, на угол β_1 по направлению вращения векторов (рис. 3.8). Тогда

$$E_n = 2E_{np} \cos \frac{\beta_1}{2} = 2E_{np} \cos \frac{\pi(\tau - y)}{2\tau} \quad (3.8)$$

В выражении (3.8) $\cos \frac{\beta_1}{2} = \cos \frac{\pi(\tau - y)}{2\tau}$ называют коэффициентом укорочения шага k_y . Для высшей гармонической

$$k_{yv} = \cos \frac{v\beta_1}{2} = \sin \frac{v\pi y}{2\tau} \quad (3.9)$$

Очевидно, что при $y = \tau$ $k_y = 1$.

Подставляя в выражение (3.8) формулу (3.4), получаем

$$E_n = 4,44k_y f \Phi \quad (3.10)$$

Укорочение шага уменьшает ЭДС витка. Однако, укорачивая шаг, можно улучшить форму кривой ЭДС, приближая ее к синусоиде. Можно укоротить шаг так, чтобы уничтожить ту или иную высшую гармоническую. Для этого нужно, чтобы выполнялось условие

$$k_{yv} = \cos \frac{v\beta_1}{2} = \cos \frac{v\pi(\tau - y)}{2\tau} = 0 \quad (3.11)$$

где v — порядок высшей гармонической.

Из условия (3.11) имеем

$$\cos \frac{v\pi(\tau - y)}{2\tau} = \cos \frac{\pi(1 + 2n)}{2},$$

где $n = 0, 1, \dots$

Следовательно, коэффициент $k_{yv} = 0$ при условии, что

$$\frac{v\pi(\tau - y)}{2\tau} = \frac{\pi(1 + 2n)}{2}$$

На практике стремятся прежде всего к уничтожению пятой и седьмой гармонических ЭДС. Приняв для простоты $n = 0$, получим

$$\tau - y = \frac{\tau}{v}$$

Таким образом, чтобы уничтожить, например, пятую гармоническую ЭДС витка, надо укоротить шаг витка на $\frac{1}{5}\tau$. В этом

случае в проводниках 1 и 2 (рис. 3.9) индуцируются пятые гармонические ЭДС, равные по величине, но направленные по контуру витка навстречу друг другу. Следовательно, $E_{в5} = 0$.

Аналогичного результата можно добиться, уменьшив шаг на $\frac{3}{5}\tau$, но при этом существенно уменьшится и ЭДС витка, что нецелесообразно. Для уничтожения седьмой гармонической ЭДС в витке его надо укоротить на $\frac{1}{7}\tau$.

Обычно не стремятся к полному уничтожению пятой или седьмой гармонических, т.е. укорачивают шаг витка не точно на $\frac{1}{5}\tau$ или $\frac{1}{7}\tau$. Можно, например, укоротить шаг на $\frac{1}{6}\tau$. В этом случае обе гармонические уменьшаются каждая примерно на $\frac{3}{4}$ от своего первоначального значения.

ЭДС обмотки. Каждая фаза обмотки состоит из нескольких последовательно или параллельно соединенных катушек. Условно левую активную сторону катушки принято считать ее началом, а правую — концом.

При последовательном соединении катушек конец первой соединяют с началом последующей так, чтобы ЭДС всех катушек складывались.

Начала первых катушек и концы последних образуют начала и концы фазных обмоток. Начала фаз обозначают — С1, С2, С3, а концы фаз — С4, С5, С6.

При параллельном соединении катушек их начала соединяют между собой, получая начала фазных обмоток. Соединение концов катушек образует концы фазных обмоток.

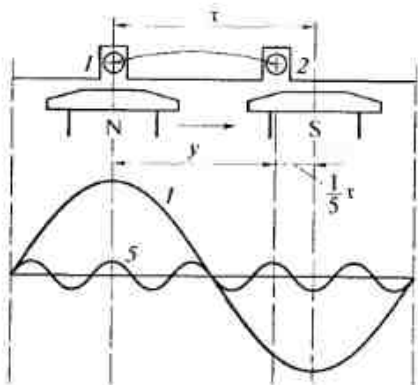


Рис. 3.9. Влияние укорочения шага: 1, 5 — гармонические; 1, 2 — проводники

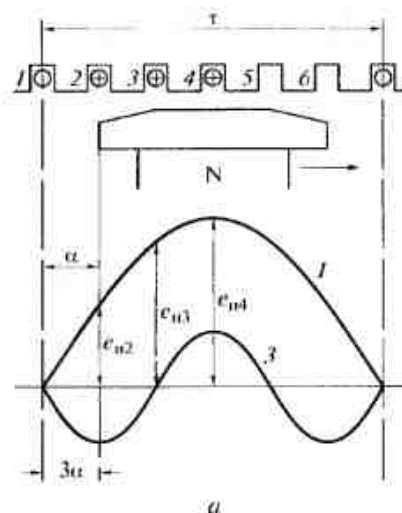


Рис. 3.10. ЭДС в пазах распределенной обмотки:

a — мгновенные значения ЭДС; b — звезда ЭДС; 1, 6 — пазы

В сосредоточенной обмотке с полным шагом все активные стороны катушек находятся в одинаковых условиях по отношению к магнитному полю, таким образом, ЭДС всех витков обмотки суммируются арифметически. Если w — число последовательно соединенных между собой витков обмотки, то действующее значение ЭДС обмотки

$$E = wE_n = 4,44k_f \Phi w. \quad (3.12)$$

Форма кривой фазной ЭДС повторяет форму кривой ЭДС одного проводника, что является существенным недостатком сосредоточенных обмоток. Поэтому обычно используют распределенные обмотки ($q_1 \neq 1$, причем q_1 может быть целым или дробным числом). В этом случае активные стороны катушек находятся в разных условиях по отношению к полюсу и соответственно к магнитному потоку. Следовательно, индуцируемые в них ЭДС будут сдвинуты по фазе друг относительно друга и складываются геометрически. Углы сдвига для разных гармонических ЭДС — разные. Если α — угол сдвига между двумя соседними пазами для гармонической 1, то для гармонической 3 сдвиг между соседними пазами равен 3α , для v -й гармонической — $v\alpha$.

На рис. 3.10, b представлена звезда первой гармонической пазовых ЭДС однослойной обмотки, изображенной на рис. 3.10, a . Это вектора наибольших значений ЭДС. Действующие значения пазовых ЭДС E_n получают при соответствующем изменении масштаба.

Мгновенные значения ЭДС, определяемые проекциями соответствующих векторов ЭДС на неподвижную ось ординат, будут соответственно равны

$$e_{a1} = E_{um} \sin \theta; \quad e_{a2} = E_{um} \sin \alpha; \quad e_{a3} = E_{um} \sin 2\alpha; \quad e_{aq} = E_{um} \sin (q-1)\alpha.$$

На рис. 3.11 изображено сложение векторов первых гармонических ЭДС. Геометрическая сумма пазовых ЭДС E_q (отрезок OD) из треугольника OO_1D равна $2OO_1 \sin(q\alpha/2)$, где отрезок O_1O (из треугольника OO_1A) равен $\frac{E_u}{2 \sin(\alpha/2)}$. Таким образом,

$$E_q = E_u \frac{\sin(q\alpha/2)}{\sin(\alpha/2)}. \quad (3.13)$$

Арифметическая сумма пазовых ЭДС (при сосредоточенной обмотке) равна qE_u .

Отношение геометрической суммы ЭДС к их арифметической сумме, называемое коэффициентом распределения обмотки, равно

$$k_p = \frac{E_q}{qE_u} = \frac{\sin(q\alpha/2)}{q \sin(\alpha/2)}. \quad (3.14)$$

Очевидно, что коэффициент распределения показывает уменьшение ЭДС распределенной обмотки по сравнению с ЭДС сосредоточенной обмотки.

Таким образом, в распределенной обмотке с w последовательно соединенных витков

$$\dot{E} = 4,44k_y k_p f \Phi w. \quad (3.15)$$

Для высших гармонических ЭДС угол сдвига между соседними пазами определяется порядком гармонической (для v -й гармонической потока он составляет $v\alpha$), а коэффициент распределения соответственно равен

$$k_{pv} = \frac{\sin(vq\alpha/2)}{q \sin(v\alpha/2)}.$$

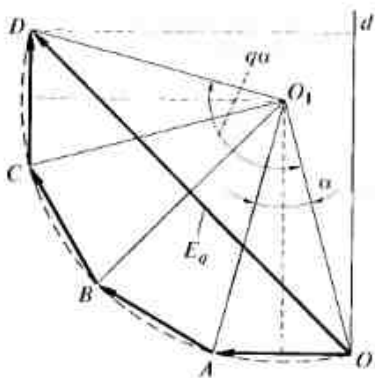


Рис. 3.11. Сложение первых гармонических ЭДС:

q — число пазов на полюс и фазу

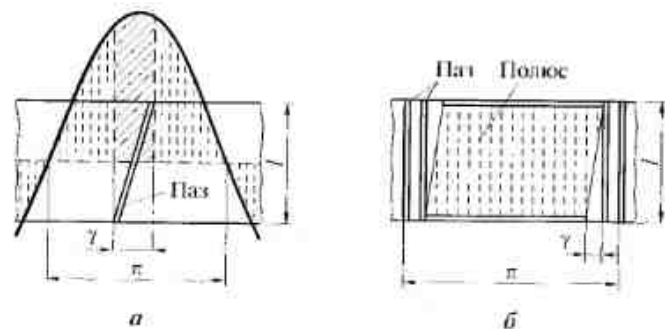


Рис. 3.12. Определение коэффициента скоса пазов: a — скос паза; b — скос полюсного наконечника

Высшие гармонические ЭДС в распределенной обмотке с укороченным шагом определяют по следующей формуле:

$$\dot{E}_v = 4,44k_y k_{pv} f_v \Phi_v w. \quad (3.16)$$

Коэффициент k_{p1} всегда меньше единицы, а коэффициенты k_{p3} , k_{p5} , ... k_{pv} , как правило, меньше k_{p1} , причем при определенном соотношении $2p$, z_1 и q_1 (например, $2p = 2$; $z_1 = 24$; $q_1 = 4$) $k_{p3} = 0$. Это означает, что третья гармоническая ЭДС равна нулю, хотя в кривой магнитной индукции она может быть сколь угодно большой.

Наличие в машине зубцового слоя создает неравномерную магнитную проводимость воздушного зазора. При движении поля в зазоре появляются дополнительные пространственные высшие гармонические поля, так называемые зубцовые гармонические, а также периодические нулевации амплитуды отдельных пространственных гармонических. В синхронных машинах с явно выраженными полюсами их удается устранить или уменьшить путем скоса пазов ротора (рис. 3.12, a) либо полюсных наконечников (рис. 3.12, b). При этом если вход и выход паза сдвинуты между собой на угол γ (см. рис. 3.12, a), то это равносильно равномерному распределению обмотки на дуге, соответствующей углу γ . В этом случае в формулу для расчета ЭДС следует вводить дополнительный коэффициент скоса паза

$$k_{ск} = \frac{\sin(\gamma/2)}{\gamma/2}. \quad (3.17)$$

Значения коэффициентов скоса пазов для высших гармонических меньше, чем для первой гармонической, поэтому скос пазов приближает форму кривой ЭДС к синусоидальной.

В дальнейшем будем обозначать

$$k_{об} = k_y k_p k_{ск}. \quad (3.18)$$

и называть этот коэффициент обмоточным; поэтому в общем случае при синусоидально распределенной индукции в зазоре машины

$$\dot{E} = 4,44k_{об}fw\Phi. \quad (3.19)$$

Для первой гармонической обычно $k_{об} = 0,92...0,97$. Это означает, что для распределенной обмотки с укороченным шагом ЭДС несколько уменьшается по сравнению с сосредоточенной обмоткой с полным шагом, но высшие гармонические, как было показано выше, уменьшаются более значительно.

В однофазных машинах процесс наведения ЭДС бывает не связан непосредственно с относительным перемещением магнитного поля и обмотки, а имеет место лишь периодическое изменение во времени потокосцепления с обмоткой, т.е. вектор индукции \vec{B} этого поля неподвижен в пространстве, а изменяется лишь во времени от $+B_{max}$ до $-B_{max}$. Далее будет показано, что в этом случае пульсирующее поле можно рассматривать как два вращающихся в противоположных направлениях, имеющих половинную амплитуду. Суммируя ЭДС, наводимые отдельно этими полями, получаем результирующую ЭДС, определяемую равенством (3.19), т.е. это равенство справедливо и для пульсирующих магнитных полей.

3.4. МДС обмоток переменного тока

МДС обмоток переменного тока, расположенных на статоре или роторе электрической машины, должна создавать в воздушном зазоре вращающееся магнитное поле. Для этого каждая из обмоток, питающаяся от синусоидально изменяющегося во времени напряжения, должна иметь МДС, синусоидально распределенную в пространстве, т.е. по расточке статора и по окружности ротора. Таким образом, МДС является как функцией времени, так и функцией пространства.

Отклонение питающего напряжения или пространственного распределения МДС от синусоидального приводит к появлению высших гармонических в кривой распределения магнитного потока, что ухудшает энергетические показатели машины.

Обычно протекающий по обмотке ток является практически синусоидальным. Поэтому в дальнейшем, если специально не оговорено, будем считать, что МДС также изменяется по синусоидальному закону во времени.

МДС однофазной сосредоточенной обмотки с полным шагом. При однофазных обмотках распределение тока в пазовом слое в течение одного полупериода остается неизменным. В следующем полупериоде меняется лишь направление тока, характер же распределения тока, а следовательно, и магнитного поля остается

неизменным. Для простоты рассмотрения примем следующие допущения:

- воздушный зазор между статором и ротором неизменен ($\delta = \text{const}$);
- сталь машины не насыщена ($\mu \approx \infty$, что соответствует $H_{ст} \approx 0$);
- в машине $2p = 2$, т.е. одна пара полюсов;
- направление тока в обмотке от начала фазы (С1) к ее концу (С4).

Магнитное поле, создаваемое током, пульсирует в фазе с изменением тока в катушке и является симметричным относительно оси витка (катушки) N—S. Каждая силовая линия этого потока сцеплена со всеми w витками обмотки, поэтому создаваемая ею МДС по закону полного тока определяется следующим соотношением:

$$\oint Hdl = iw = F_{\Sigma}, \quad (3.20)$$

где iw — мгновенное значение полного тока катушки; F_{Σ} — МДС обмотки.

Согласно принятым допущениям ($\mu = \infty$ и $H_{ст} = 0$) выражение (3.20) можно представить в другом виде:

$$\oint Hdl = H2\delta = \frac{B2\delta}{\mu_0} = F_{\Sigma}, \quad (3.21)$$

где $B = \frac{F_{\Sigma}\mu_0}{2\delta}$ — индукция в воздушном зазоре; μ_0 — магнитная постоянная.

Из формулы (3.21) следует, что распределение МДС в воздушном зазоре, повторяя кривую индукции, имеет прямоугольную форму, а ее ординаты численно равны МДС, отнесенной к одному полюсу, т.е. $\frac{F_{\Sigma}}{2} = F$. При максимальном значении тока в обмотке эта МДС также имеет максимальное значение

$$F_{max} = \frac{1}{2}I_m w = \frac{\sqrt{2}}{2}Iw, \quad (3.22)$$

а амплитуда первой гармонической МДС

$$F_1 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}Iw \approx 0,9Iw, \quad (3.23)$$

где I — действующее значение тока обмотки.

Знак МДС меняется в соответствии с изменением полярности статора на данном участке.

МДС прямоугольной формы можно разложить в гармонический ряд, т.е. представить в виде суммы МДС, синусоидально распределенных в пространстве:

$$F(\alpha) = \frac{4}{\pi} F_1 \left(\cos \alpha - \frac{1}{3} \cos 3\alpha + \frac{1}{5} \cos 5\alpha - \dots - \frac{1}{v} \cos v\alpha \right), \quad (3.24)$$

где α — пространственный угол; $\frac{F_1}{v} = F_v$ — амплитуда пространственной гармонической v -го порядка.

Зависимость МДС любой гармоники от времени и пространственного угла α определяется выражением

$$f_v = \pm F_v \sin \omega t \cos v\alpha, \quad (3.25)$$

С увеличением номера гармонической растет ее пространственная периодичность. Поэтому число полюсов пространственной гармонической МДС равно

$$2p_v = 2pv.$$

Разложение МДС прямоугольной формы в ряд показывает, что при сосредоточенной обмотке отклонение кривой МДС от синусоидальной формы велико, полезный же магнитный поток создает основная гармоническая МДС.

Это обстоятельство существенно ограничивает применение сосредоточенной обмотки.

МДС распределенной однофазной обмотки. На рис. 3.13 показана обмотка статора, состоящая из трех катушек. МДС основных гармонических каждой из этих катушек представляют собой синусоиды, максимальные значения которых ($F_{ik, \max}$) совпадают с осями соответствующих катушек, т.е. между векторами МДС этих катушек имеется пространственный сдвиг на угол γ , равный пазовому смещению катушек обмотки относительно друг друга.

МДС основной гармонической всей обмотки — синусоида, полученная сложением ординат синусоид МДС катушек. Максимальное значение этой МДС ($F_{1, \max}$) совпадает с осью обмотки. Ее амплитуда определяется геометрической суммой векторов амплитуд МДС катушек.

При сосредоточенной обмотке (катушки расположены в двух пазах, $\gamma = 0$) результирующая МДС определяется арифметической суммой МДС катушек.

Таким образом, распределение обмотки по пазам ведет к уменьшению ее МДС, которое учитывается коэффициентом распределения обмотки. Для МДС основной гармонической это уменьшение невелико, однако для высших гармонических оно значительно.

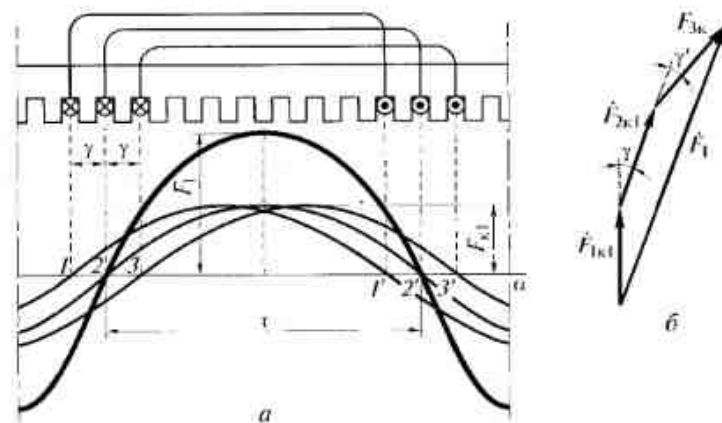


Рис. 3.13. МДС основной гармоники распределенной обмотки статора: a — сложение ординат; b — сложение векторов

Амплитуда пространственной гармоники распределенной обмотки определяется выражением

$$F_v = \frac{0,9}{v} I_1 w_1 q_1 k_{pv}. \quad (3.26)$$

Если машина имеет несколько пар полюсов ($p > 1$), то при q_1 , равном целому числу, в силу симметрии обмотки график МДС на каждой паре полюсов будет повторяться, поэтому МДС фазной обмотки будет определяться аналогично.

Для однослойных обмоток при последовательном соединении всех катушек фазы $w_1 = pq_1 w$. Тогда амплитудное значение пространственной гармоники фазы

$$F_{fv} = \frac{0,9}{v} I_1 w_1 q_1 k_{pv} p.$$

Это выражение справедливо и при параллельном соединении ряда катушек, так как при уменьшении числа последовательно соединенных витков в обмотке фазы в a раз ток в обмотке увеличится во столько же раз (a — число параллельных ветвей в обмотке фазы).

В двухслойных распределенных обмотках применяют катушки с укороченным шагом. На двойном полюсном делении располагается несколько катушек.

Путем изменения порядка соединения проводников в витках их можно привести к катушкам с полным шагом. В этом случае уменьшение амплитуды МДС катушечной группы учитывается коэффициентом распределения.

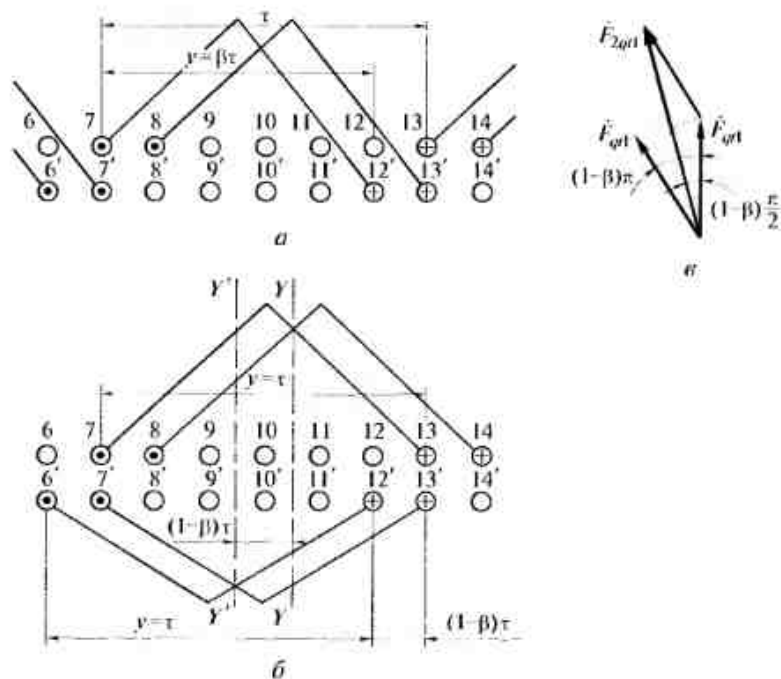


Рис. 3.14. Замена двухслойной обмотки двумя однослойными: *a* — двухслойная обмотка; *б* — однослойные обмотки; *в* — сложение векторов МДС

В двухслойной обмотке также можно изменить порядок соединения проводников в витках (рис. 3.14), сохраняя направление тока в них и принадлежность данной фазы. На рис. 3.14 видно, что магнитные оси катушек $Y-Y'$ и $Y''-Y'''$ сдвинуты на дугу $(1-\beta)\tau$, а векторы амплитуд первой гармонической МДС, совпадающие с магнитными осями соответствующих катушек, образуют между собой угол $(1-\beta)\pi$.

Сумма векторов МДС катушек определяет вектор МДС обоих слоев. Его величина равна

$$F = 2F_1 \cos(1-\beta) \frac{\pi}{2} = 2F_1 \sin \beta \frac{\pi}{2} = 2F_1 k_y. \quad (3.27)$$

Таким образом, уменьшение амплитуды МДС, вызванное укорочением шага витка, учитывается коэффициентом укорочения k_y .

Сложение высших гармонических МДС производится аналогично с учетом коэффициента укорочения.

Исходя из изложенного, амплитуда МДС обмотки фазы с учетом укорочения шага витка и распределения обмотки равна

$$F_\Phi = \frac{0,9}{v} I_1 w_1 q_1 k_{yv} = \frac{0,9}{v} I_1 w_1 q_1 k_{обв}. \quad (3.28)$$

Скос пазов не изменяет амплитуду МДС катушечной группы, поскольку МДС не меняется по длине проводника.

МДС однофазной обмотки прямо пропорциональна переменному току в ней и, следовательно, пульсирует с частотой f_1 , принимая различные мгновенные значения от $+F_\Phi$ до $-F_\Phi$ на каждом полном делении.

При этом все гармонические составляющие МДС пульсируют с одинаковой частотой.

Каждую гармоническую составляющую можно представить в виде суммы двух синусоид, имеющих постоянную половинную амплитуду синусоидально распределенных по окружности статора (ротора):

$$F_{m\Phi v} \sin \omega t \cos v\alpha = 0,5 F_{m\Phi v} \sin(\omega t - v\alpha) + 0,5 F_{m\Phi v} \sin(\omega t + v\alpha). \quad (3.29)$$

Угловые скорости перемещения амплитуд равны по величине, но противоположны по направлению.

Поскольку МДС синусоидальны, их амплитуды можно представить векторами.

Следовательно, вектор пульсирующей МДС может быть получен путем сложения двух вращающихся векторов МДС $F_{\Phi v \text{ впр}}$ и $F_{\Phi v \text{ обр}}$ одинаковых по величине, но вращающихся в противоположные стороны.

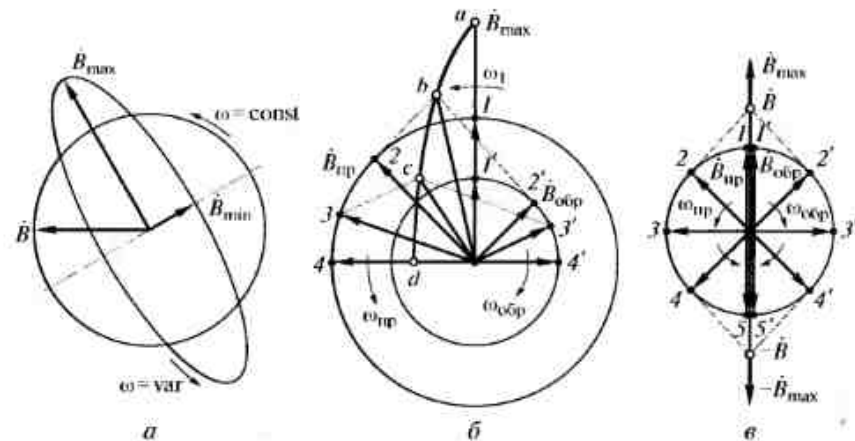


Рис. 3.15. Вращающиеся магнитные поля:

a — круговое и эллиптическое; *б* и *в* — разложение эллиптического и пульсирующего магнитных полей на два круговых вращающихся поля

Вектор индукции этого поля неподвижен в пространстве и изменяется только во времени от $+B_{\max}$ до $-B_{\max}$ (рис. 3.15), когда векторы $B_{\text{пр}}$ и $B_{\text{обр}}$ совпадают по направлению, проходя через нулевое значение, и когда эти векторы направлены встречно.

Таким образом, однофазная обмотка, включенная в сеть переменного тока, создает пульсирующее магнитное поле, которое можно представить в виде суммы двух полей, вращающихся в противоположных направлениях — прямого и обратного.

МДС трехфазной обмотки статора. При включении трехфазной обмотки в сеть с симметричным трехфазным напряжением ток во всех фазных обмотках имеет одинаковую амплитуду и различается по фазе на одну треть периода, т. е.

$$i_A = \sqrt{2}I_\phi \sin \omega t;$$

$$i_B = \sqrt{2}I_\phi \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right);$$

$$i_C = \sqrt{2}I_\phi \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right).$$

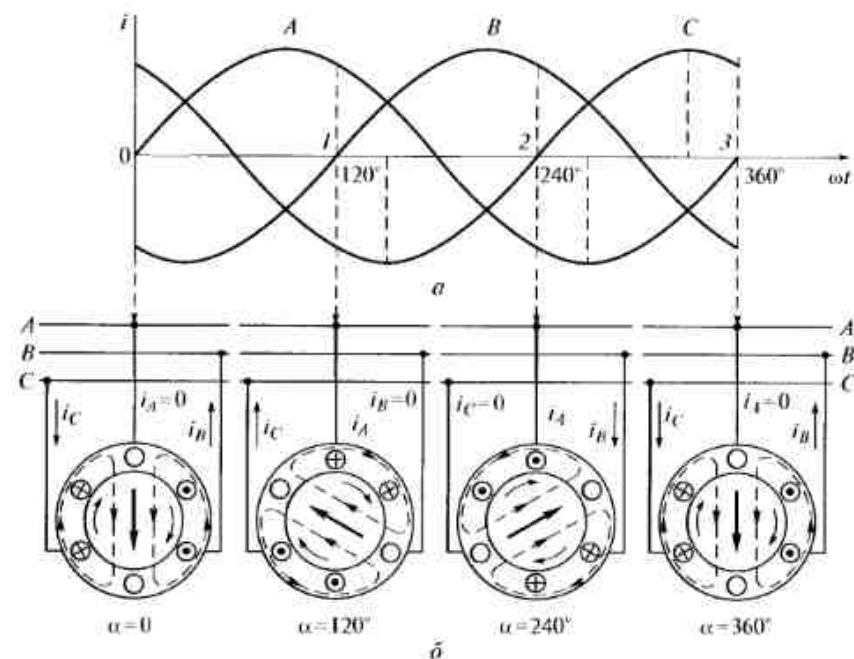


Рис. 3.16. Принцип образования вращающейся МДС:
 a — токи в фазах трехфазной обмотки; b — МДС трехфазной обмотки в разные моменты времени

Ток каждой обмотки создает пульсирующую МДС, а их совместное действие создает МДС, вектор которой вращается относительно статора.

Образование вращающейся МДС можно продемонстрировать на простейшей трехфазной двухполюсной сосредоточенной обмотке, каждая фаза которой состоит из одной катушки ($q_1 = 1$). Рассмотрим три катушки ($C1-C4$), ($C2-C5$), и ($C3-C6$), принадлежащие соответственно фазам A , B и C . Обмотки, сдвинутые в пространстве на 120° друг относительно друга, соединены по схеме звезда и включены в трехфазную сеть. Для построения вектора МДС трехфазной обмотки выберем, например, четыре определенных момента времени, отмеченных на рис. 3.16 и имеющих временной сдвиг в 120° : 1) ток в фазе A равен 0; 2) ток в фазе B равен 0; 3) ток в фазе C равен 0; 4) ток в фазе A вновь равен 0.

Для первого момента времени ток в фазе B имеет отрицательное значение, а ток в фазе C — положительное; в следующий момент времени ток в фазе A — положителен, а в фазе C — отрицателен; в третий момент ток в фазе A — отрицателен, а в фазе B — положителен; в заключительный момент времени ток в фазе B — отрицателен, а в фазе C — положителен. Если в соответствии с указанными направлениями токов построить направления МДС трехфазной обмотки для названных моментов времени, видно, что вектор МДС поворачивается относительно предыдущего момента времени на 120° и за один период переменного тока (T) совершает полный оборот, т. е. перемещается в пространстве на два полюсных деления (2τ).

Таким образом, линейная скорость (м/с) перемещения вектора МДС

$$v = \frac{2\tau}{T} = 2\tau f_1,$$

где f_1 — частота переменного тока.

Частота вращения (мин $^{-1}$), называемая синхронной, определяется выражением

$$n_1 = \frac{f_1 60}{p}. \quad (3.30)$$

Вращающаяся МДС создает в расточке статора вращающееся магнитное поле.

Чтобы изменить направление вращения МДС необходимо изменить порядок следования токов в обмотке, поменяв места присоединения к сети любых двух проводов, отходящих от зажимов обмотки статора.

Вращающееся магнитное поле статора может быть круговым (когда пространственный вектор магнитной индукции вращается равно-

мерно и его значение в любом пространственном положении остается неизменным) или эллиптическим. Круговое вращающееся поле создается многофазной обмоткой, если векторы магнитной индукции каждой фазы представляют собой симметричную систему.

В трехфазной обмотке это достигается тем, что все фазные обмотки выполнены одинаковыми, их оси смещены в пространстве на 120 эл. град и включены в сеть с симметричным трехфазным напряжением.

Круговое вращающееся поле можно получить и в двухфазной обмотке, если оси фазных обмоток смещены в пространстве на 90 эл. град, а токи, питающие эти обмотки, имеют одинаковую амплитуду и сдвинуты по фазе друг относительно друга на четверть периода, т.е. на 90°.

Эллиптическое поле образуется при несоблюдении изложенных выше условий.

В этом случае пространственный вектор магнитной индукции поля B можно представить в виде суммы векторов магнитных индукций прямого и обратного вращающихся магнитных полей: $B = B_{пр} + B_{обр}$. Он не остается постоянным в различные моменты времени, так как $B_{пр} > B_{обр}$ и, вращаясь неравномерно, описывает эллипс (см. рис. 3.15, а).

Для определения амплитуды основной гармоники МДС трехфазной обмотки необходимо сложить основные гармоники МДС обмоток фаз, оси которых смещены в пространстве на 120 эл. град:

$$\begin{aligned} f_A &= F_{\phi 1} \sin \omega t \cos \alpha = 0,5 F_{\phi 1} [\sin (\omega t - \alpha) + \sin (\omega t + \alpha)]; \\ f_B &= F_{\phi 1} \sin (\omega t - 120^\circ) \cos (\alpha - 120^\circ) = \\ &= 0,5 F_{\phi 1} [\sin (\omega t - \alpha) + \sin (\omega t + \alpha - 240^\circ)]; \\ f_C &= F_{\phi 1} \sin (\omega t - 240^\circ) \cos (\alpha - 240^\circ) = \\ &= 0,5 F_{\phi 1} [\sin (\omega t - \alpha) + \sin (\omega t + \alpha - 120^\circ)]. \end{aligned}$$

Следовательно, МДС трехфазной обмотки равна

$$f_1 = f_A + f_B + f_C = 1,5 F_{\phi 1} \sin (\omega t - \alpha) = F_1 \sin (\omega t - \alpha),$$

где

$$F_1 = 1,5 F_{\phi 1} = 1,35 I_1 w_1 \frac{k_{сфв}}{p} \quad (3.31)$$

— амплитуда основной гармоники МДС трехфазной обмотки на один полюс при симметричной нагрузке фаз.

В общем случае при m_1 -фазной обмотке амплитуда МДС для v -й гармоники будет равна

$$F_v = 0,5 m_1 F_{\phi v} = 0,45 m_1 I_1 w_1 \frac{k_{сфв}}{v p} \quad (3.32)$$

3.5. Индуктивные сопротивления обмоток

Индуктивные сопротивления самоиндукции и взаимной индукции. Каждая гармоническая составляющая МДС создает гармоническую составляющую магнитной индукции с амплитудой

$$B_{\phi v} = \frac{\mu_0}{\delta} F_{\phi v} \quad (3.33)$$

которые определяют гармонические составляющие магнитного потока.

Для m_1 -фазной обмотки гармонические магнитного потока будут определяться выражением

$$\Phi_{\phi v} = \frac{2\sqrt{2}\mu_0 t d m_1 w_1 k_{сфв}}{\pi^2 k_a k_r \delta v^2 p} I_1 \quad (3.34)$$

где k_a — коэффициент насыщения, учитывающий насыщение стальных участков магнитной цепи; k_r — коэффициент воздушного зазора, учитывающий наличие пазов на статоре и роторе.

Вращающиеся гармонические магнитного потока наводят ЭДС самоиндукции в обмотке, которой они созданы, а в других обмотках — ЭДС взаимной индукции.

При неподвижном роторе и равномерном воздушном зазоре скорость вращения гармонических магнитного потока обратно пропорциональна порядку гармонических, а количество полюсов прямо пропорционально порядку гармонических, поэтому частота всех гармонических ЭДС неизменна и равна частоте изменения тока в обмотке.

При вращении ротора нарушается пропорциональность между скоростью вращения гармонических магнитных потоков (статора относительно ротора и ротора относительно статора) и числом полюсов, поэтому частота ЭДС взаимной индукции от гармонических магнитного потока различна, т.е. высшие гармонические магнитного потока не создают ЭДС взаимной индукции основной частоты и их можно учитывать вместе с потоками рассеяния.

Наличие пазов на статоре и роторе вызывает дополнительные гармонические магнитного потока, которые наводят ЭДС самоиндукции и взаимной индукции различных частот, однако они практически не влияют на основной процесс преобразования энергии. Таким образом, рабочие характеристики электрических машин в основном определяют первые гармонические МДС и ЭДС, которые и будем рассматривать в дальнейшем.

Если в выражение (3.16) для первой гармонической ЭДС самоиндукции фазной обмотки подставить значение первой гармонической магнитного потока из соотношения (3.34), получим

$$E_1 = \frac{4m_1 f_1}{\pi} \frac{\mu_0 \tau l}{k_n k_g \delta} \frac{w_1^2 k_{об1}^2}{\rho} I_1, \quad (3.35)$$

где $f_1 = f$.

Полное индуктивное сопротивление самоиндукции обмотки статора

$$x_{11} = \frac{E_1}{I_1} = \frac{4m_1 f_1}{\pi} \frac{\mu_0 \tau l}{k_n k_g \delta} \frac{w_1^2 k_{об1}^2}{\rho}, \quad (3.36)$$

и полное индуктивное сопротивление самоиндукции обмотки ротора при неподвижном роторе (т. е. при частоте $f_2 = f_1$)

$$x_{22} = \frac{E_2}{I_2} = \frac{4m_2 f_1}{\pi} \frac{\mu_0 \tau l}{k_n k_g \delta} \frac{w_2^2 k_{об2}^2}{\rho}. \quad (3.37)$$

Индуктивное сопротивление взаимоиндукции обмотки статора с обмоткой ротора определяется ЭДС взаимоиндукции E_{12} , наводимой в обмотке статора магнитным потоком, созданным током обмотки ротора. Уменьшение ЭДС взаимоиндукции вследствие скоса пазов ротора (или статора) учитывают коэффициентом скоса пазов

$$x_{12} = \frac{E_{12}}{I_2} = \frac{4m_2 f_1}{\pi} \frac{\mu_0 \tau l}{k_n k_g \delta} \frac{w_1 k_{об1} w_2 k_{об2} k_{ск}}{\rho}. \quad (3.38)$$

Индуктивное сопротивление взаимоиндукции обмотки ротора с обмоткой статора

$$x_{21} = \frac{E_{21}}{I_1} = \frac{4m_1 f_1}{\pi} \frac{\mu_0 \tau l}{k_n k_g \delta} \frac{w_1 k_{об1} w_2 k_{об2} k_{ск}}{\rho}. \quad (3.39)$$

При вращении ротора индуктивные сопротивления x_{22} и x_{21} изменяются пропорционально частоте соответствующих ЭДС.

Индуктивные сопротивления рассеяния. Кроме основного магнитного потока, который сцепляется с проводниками обмоток статора и ротора, существуют потоки рассеяния, которые сцепляются только с одной обмоткой (статора или ротора). Для удобства рассмотрения магнитный поток рассеяния разделяют на составляющие.

Различают поток пазового рассеяния (на протяжении активной стороны катушки в основном замыкается поперек пазов), лобового рассеяния (замыкается вокруг лобовых частей обмотки) и дифференциального рассеяния, обусловленного наличием высших гармонических в кривых магнитного потока и ЭДС. Высшие гармонические магнитного потока в зазоре рассматривают как поток дифференциального рассеяния, определяемый разностью

между полным потоком в воздушном зазоре и его первой гармонической.

Если в пазах расположена только одна обмотка, поток пазового рассеяния статора (ротора) не сцепляется с другой обмоткой и не индуцирует в ней ЭДС взаимоиндукции.

Поля лобового и дифференциального рассеяния сцепляются с другой обмоткой настолько слабо, что их взаимоиндуктивными связями можно пренебречь. Таким образом, поля рассеяния индуцируют в обмотке ЭДС самоиндукции, называемую ЭДС рассеяния, которую можно учесть с помощью индуктивного сопротивления рассеяния.

Поля рассеяния замыкаются в основном через воздушные промежутки, поэтому магнитным сопротивлением стали можно пренебречь и считать, что индуктивность рассеяния $L_s = \text{const}$. Тогда ЭДС рассеяния

$$e_s = -\frac{d(L_s i)}{dt} = -L_s \frac{di}{dt}.$$

Поскольку $i = I_m \sin \omega t$, то

$$e_s = -\omega L_s I_m \cos \omega t = x_s I_m \cos \omega t,$$

где $x_s = \omega L_s$ — индуктивное сопротивление рассеяния.

Каждому потоку рассеяния соответствует определенная магнитная проводимость. Полная магнитная проводимость потоков рассеяния равна сумме магнитных проводимостей:

$$\Lambda = \Lambda_n + \Lambda_b + \Lambda_d,$$

где Λ_n — проводимость потока пазового рассеяния; Λ_b — проводимость потока лобового рассеяния; Λ_d — проводимость дифференциального рассеяния.

Магнитные проводимости можно рассчитать через коэффициенты удельных (приходящихся на единицу расчетной активной длины машины l_n) магнитных проводимостей потоков рассеяния ($\lambda_n, \lambda_b, \lambda_d$):

$$\Lambda = \mu_0 l_n (\lambda_n + \lambda_b + \lambda_d) = \mu_0 l_n \lambda.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки фазы, обусловленное всеми потоками рассеяния, определяют по формуле

$$x_s = \frac{4\pi f w \mu_0 l_n \lambda}{\rho q}. \quad (3.40)$$

Методы определения коэффициентов удельных магнитных проводимостей приводятся в учебниках по проектированию электрических машин.

Контрольные вопросы

1. Что называется активными частями машины?
2. Есть ли различие в конструкциях роторов машин переменного тока?
3. Чем определяется характер изменения во времени ЭДС, индуцированной в проводнике?
4. На какие гармонические составляющие можно разложить несинусоидальные кривые индукции и ЭДС?
5. Какими средствами можно ослабить высшие временные гармоники?
6. Какими методами можно подавить высшие пространственные гармоники?
7. Назовите условия создания вращающего магнитного поля.
8. Перечислите индуктивные сопротивления обмоток.

ГЛАВА 4

АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

4.1. Конструкции, назначение и области применения асинхронных машин

Асинхронная машина — двухобмоточная электрическая машина переменного тока, у которой только одна обмотка (первичная) получает питание от электрической сети с постоянной частотой f_1 , а вторая (вторичная) обмотка замыкается накоротко или на электрические сопротивления. Токи во вторичной обмотке появляются в результате действия электромагнитной индукции. Их частота f_2 является функцией угловой скорости ротора ω , которая, в свою очередь, зависит от вращающего момента, приложенного к валу.

Наибольшее распространение получили асинхронные машины с трехфазной симметричной обмоткой на статоре, питаемой от сети переменного тока, и с трехфазной или многофазной симметричной обмоткой на роторе (см. подразд. 3.1).

Асинхронные машины в основном используют как двигатели; в качестве генераторов их применяют крайне редко. Асинхронный двигатель является наиболее распространенным типом двигателя переменного тока.

Наибольшее распространение получают дешевые в производстве и надежные в эксплуатации двигатели с короткозамкнутым ротором (рис. 4.1). Как правило, их изготавливают в следующих модификациях: с одиночной «беличьей клеткой» на роторе, глубокопазные, с бутылочными пазами. Кроме того, бывают двигатели с двойной клеткой на роторе (двухклеточные). На статоре расположена трехфазная обмотка, которая при подключении к сети трехфазного тока создает вращающееся магнитное поле. Обмотка ротора выполняется короткозамкнутой (рис. 4.2, *а*).

«Беличья клетка» обычно состоит из алюминиевых (реже — медных) стержней, замкнутых накоротко с торцов двумя кольцами (рис. 4.2, *б*). Стержни этой обмотки расположены в пазах сердечника ротора без изоляции. В двигателях малой и средней мощности «беличью клетку» обычно изготавливают путем заливки расплавленного алюминия (обладающего малой плотностью, легкоплавкостью и высокой электропроводностью) в полуоткрытые или закрытые паза сердечника ротора (рис. 4.2, *в*). Одновременно со стерж-

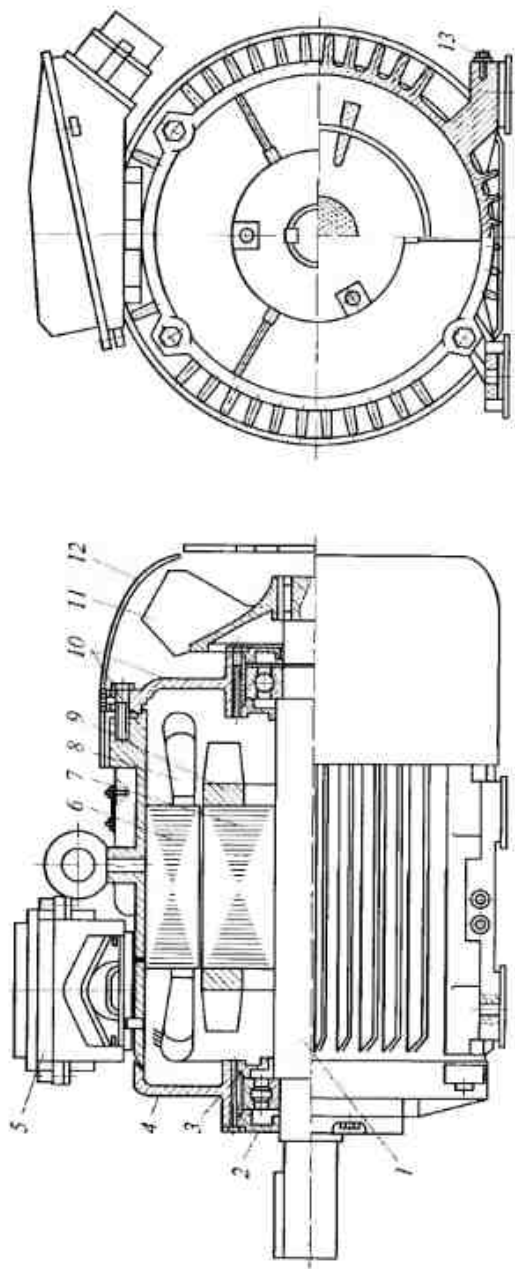


Рис. 4.1. Общий вид асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

1 — вал; 2 — крышка подшипниковая наружная; 3 — крышка подшипниковая внутренняя; 4 — шит подшипниковый; 5 — коробка выводов; 6 — сердечник статора; 7 — сердечник ротора; 8 — обмотка статора; 9 — обмотка ротора; 10 — шит подшипниковый; 11 — вентилятор; 12 — кожух вентилятора; 13 — болт заземления

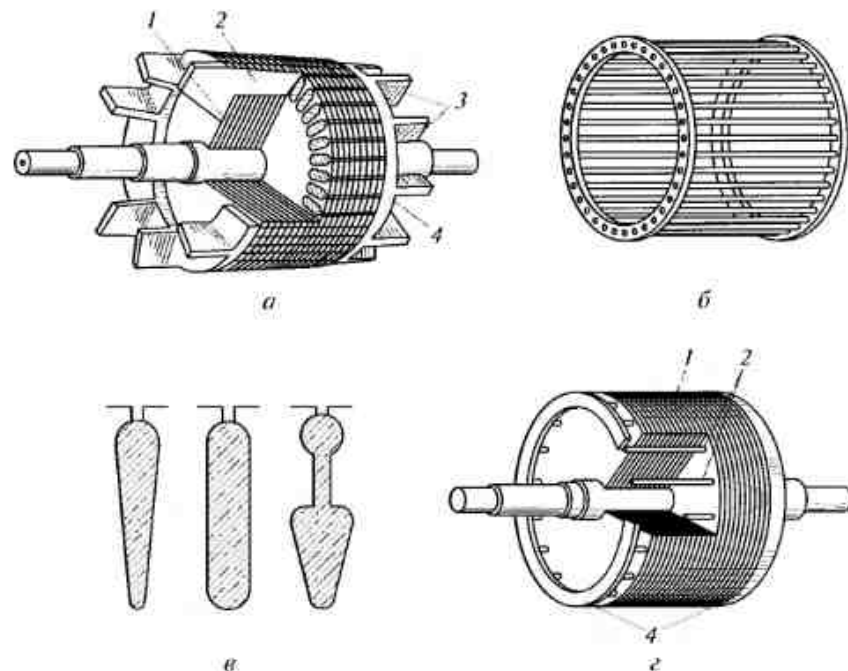


Рис. 4.2. Конструкция короткозамкнутого ротора:

a — ротор с обмоткой; *б* — обмотка «беличьей клетки»; *в* — формы пазов ротора; *г* — короткозамкнутый ротор двигателя большой мощности; 1 — сердечник ротора; 2 — стержни; 3 — вентиляционные дощечки; 4 — короткозамыкающие кольца

жнями «беличьей клетки» отливают короткозамыкающие кольца и торцевые вентиляционные лопасти. В двигателях большой мощности «беличью клетку» выполняют из медных стержней, концы которых сваривают в короткозамыкающие кольца (рис. 4.2, *г*). Таким образом, «беличья клетка» представляет собой многофазную обмотку, замкнутую накоротку. Число фаз обмотки m_2 равно числу пазов ротора z_2 , причем в каждую фазу входят один стержень и прилегающие к нему участки короткозамыкающих колец.

Чтобы уменьшить действие высших гармонических ЭДС, обусловленных пульсациями магнитного потока из-за наличия зубцов, снизить вибрации и шум, вызываемый магнитными причинами, и устранить явления прилипания ротора к статору, которое иногда наблюдается в микродвигателях, на статоре или роторе делают ское пазов.

Для двигателей с короткозамкнутой обмоткой на роторе характерна жесткая механическая характеристика (при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной их частота вращения

уменьшается всего на 2...5%). Кроме того, они обладают также довольно высоким начальным пусковым вращающим моментом (при глубоких и бутылочных пазах в роторе). Их основные недостатки: трудность осуществления плавного регулирования частоты вращения в широких пределах; большие пусковые токи (в 5—7 раз превышающие номинальный ток).

Двигатели с фазным ротором и с контактными кольцами лишены этих недостатков ценой усложнения конструкции ротора (рис. 4.3, а), что приводит к их заметному удорожанию (примерно на 50%) и снижению надежности по сравнению с короткозамкнутыми двигателями. Обмотка статора двигателей с фазным ротором выполнена так же, как и в двигателях с короткозамкнутым

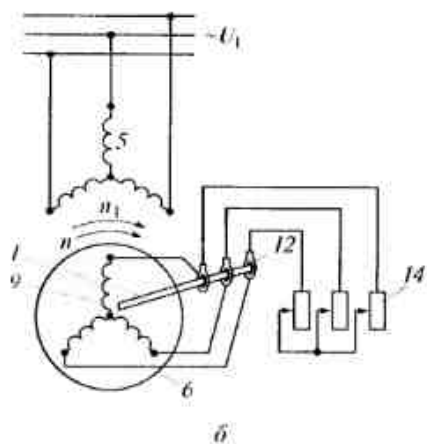
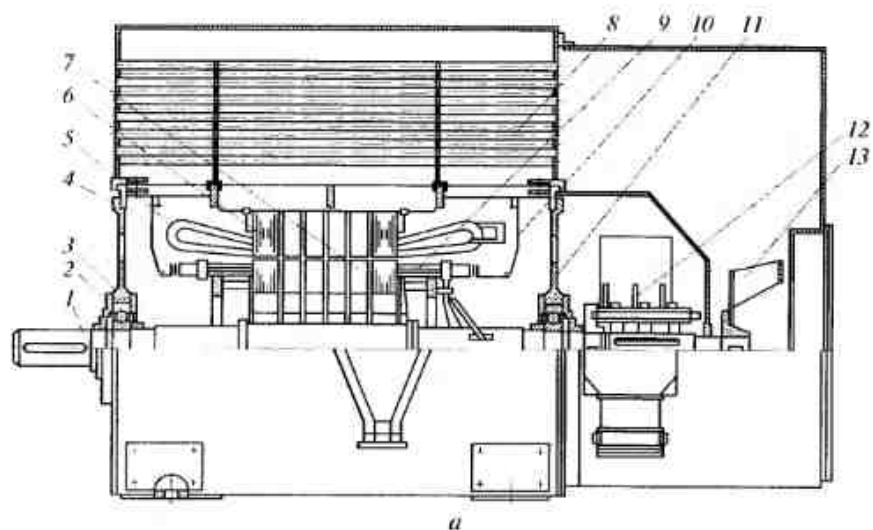


Рис. 4.3. Общий вид асинхронного двигателя с фазным ротором и схема его включения:

а — продольный разрез асинхронного двигателя; б — схема включения двигателя в сеть; 1 — вал; 2 — крышка подшипниковая наружная; 3 — крышка подшипниковая внутренняя; 4 — щит подшипниковый; 5 — обмотка статора; 6 — сердечник статора; 7 — сердечник ротора; 8 — воздухоохладитель; 9 — обмотка ротора; 10 — щиток, направляющий воздух; 11 — щит подшипниковый; 12 — узел контактных колец; 13 — вентилятор; 14 — пусковой реостат

ротором. Ротор имеет трехфазную обмотку с тем же числом полюсов. Обмотка ротора обычно соединена по схеме звезда (Y) и выведена к трем контактными кольцам (рис. 4.3, б), расположенным на валу машины. С помощью щеток, скользящих по контактными кольцам в цепь ротора, можно вводить добавочные сопротивления. Двигатели с фазным ротором используют при тяжелых условиях пуска, а также при необходимости плавного регулирования частоты вращения (например, в электроприводах грузоподъемных машин и т.п.).

Добавочные сопротивления вводятся в обмотку ротора только при пуске двигателя, что приводит к увеличению пускового момента и уменьшению пусковых токов и облегчает пуск двигателя. При работе асинхронного двигателя пусковой реостат полностью отключается, а обмотка ротора замыкается накоротко. Чтобы уменьшить износ колец и щеток, двигатели с фазным ротором иногда оснащают приспособлениями для подъема щеток и замыкания колец накоротко после выключения реостата. В таких двигателях повысить КПД удастся за счет исключения потерь от трения колец о щетки и электрических потерь в переходном контакте щеток. Однако введение этих приспособлений усложняет конструкцию электродвигателя и несколько снижает надежность его работы, поэтому обычно применяют конструкции, в которых щетки постоянно соприкасаются с контактными кольцами.

Выпускаемые заводами асинхронные двигатели предназначены для работы в различных (климатических, эксплуатационных и др.) условиях с определенными номинальными техническими данными. К числу номинальных данных асинхронных двигателей, которые указываются на заводском щитке машины, укрепленном на ее корпусе, относятся:

- механическая мощность, развиваемая двигателем, $P_{ном} = P_{2ном}$;
- частота сети f_1 ;
- линейное напряжение статора $U_{1л}$;
- линейный ток статора $I_{1л}$;
- частота вращения ротора $n_{ном}$;
- коэффициент мощности $\cos \varphi_{ном}$;
- КПД $\eta_{ном}$.

Если у трехфазной обмотки статора выведены начала и концы фаз и она может быть включена по схеме соединения звезда или треугольник, то указывают линейные напряжения и токи для каждого из возможных соединений (Y/Δ) в виде дроби ($U_{лY}/U_{лΔ}$ и $I_{лY}/I_{лΔ}$). Кроме того, у двигателя с фазным ротором на щитке приводят значение напряжения на разомкнутых кольцах при неподвижном роторе и линейного тока ротора в номинальном режиме.

Номинальные данные асинхронных двигателей варьируются в широких пределах. Номинальная мощность — от долей ватта до десятков тысяч киловатт. При частоте сети 50 Гц номинальная

синхронная частота вращения $n_{\text{ном}}$ — от 3 000 до 500 мин⁻¹ и менее (в особых случаях). При повышенных частотах — до 100 000 мин⁻¹ и более (номинальная частота вращения ротора обычно на 2...5 % меньше синхронной; в микродвигателях — на 5...20 %). Номинальное напряжение — от 24 В до 10 кВ (большие значения при больших мощностях). Значение номинального КПД асинхронных двигателей увеличивается с ростом их мощности и частоты вращения; при мощности более 0,5 кВт он составляет 0,65...0,95, в микродвигателях 0,2...0,65. Номинальный коэффициент мощности асинхронных двигателей, равный отношению активной мощности к полной мощности, потребляемой из сети, также повышается с ростом мощности и частоты вращения двигателей; при мощности более 1 кВт он составляет 0,7—0,9; в микродвигателях 0,3—0,7.

4.2. Принцип действия асинхронной машины

В обмотке статора, включенной в сеть, создается магнитное поле, первая гармоническая которого вращается с частотой $n_1 = 60f_1/p$. Поле пересекает проводники обмотки ротора и наводит в них ЭДС. Если цепь ротора замкнута, то в ней появится ток. На проводники с током, расположенные в магнитном поле, действуют электромагнитные силы, суммарное усилие которых образует электромагнитный момент.

Между статором и ротором асинхронной машины существует магнитная связь, такая же, как между первичной и вторичной обмотками трансформатора. Обычно первичная обмотка асинхронной машины, т. е. та, к которой подводится электрическое напряжение, располагается на статоре, а вторичная обмотка, в которой происходит преобразование электрической энергии в механическую, укладывается на роторе.

Частота n , с которой вращается ротор, обязательно должна отличаться от частоты вращающегося магнитного поля n_1 , так как при $n = n_1$ ротор неподвижен относительно поля статора, ЭДС и ток в обмотке ротора равны нулю и электромагнитный момент отсутствует.

Разность частот вращения n_1 и n , выраженная в относительных единицах

$$s = (n_1 - n)/n_1, \quad (4.1)$$

или в процентах

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} 100 \quad (4.2)$$

называется *скольжением асинхронной машины* и представляет собой один из основных параметров, определяющих работу машины.

4.3. Режимы работы асинхронной машины

В зависимости от соотношения частот n_1 и n и их взаимного направления различают следующие режимы работы асинхронной машины: двигателем, генератором, электромагнитным тормозом.

Работа в режиме двигателя. Предположим, что поле статора вращается по ходу часовой стрелки и имеет полярность, показанную на рис. 4.4. Если ротор неподвижен или вращается с частотой $n < n_1$, то линии поля статора перемещаются относительно ротора слева направо с частотой $n_1 - n$. В проводнике a обмотки ротора наводится ЭДС E_2 , направленная по правилу правой руки на нас. То же направление в проводнике a имеет и активная составляющая тока I_2 . Взаимодействие поля, созданного током I_2 (штриховые линии на рис. 4.4, *а*), с полем статора образует результирующее поле (рис. 4.4, *в*). На рисунке видно, что в данных условиях сила F , приложенная к проводнику, создает на валу машины момент, который стремится повернуть ротор в направлении вращения поля, т. е. является вращающим моментом. Совокупность моментов, созданных отдельными проводниками, образует результирующий вращающий момент машины M . Если этот момент достаточен для преодоления нагрузочного момента на валу, то машина приходит во вращение с частотой $n < n_1$ и работает двигателем, преобразовывая подводимую к ней электрическую энергию в механическую. Частота n , с которой вращается ротор двигателя зависит от его нагрузки.

При пуске двигателя $n = 0$ и, следовательно, скольжение $s = +1$; при холостом ходе $n = n_1$, однако, как было отмечено выше, вследствие трения частота ротора n не может достигнуть частоты поля n_1 . Таким образом, асинхронная машина работает двигателем в пределах от $s = +1$ до $s = 0$.

Работа в режиме генератора. Пусть к валу ротора с помощью приводного двигателя приложен механический момент и ротор ускорен так, что $n > n_1$ (рис. 4.4, *б*), причем полярность поля статора и направление вращения осталось такими же, как изображено на рис. 4.4, *а*. Поскольку вращающееся поле статора отстает от вращающегося ротора, скольжение становится отрицательным.

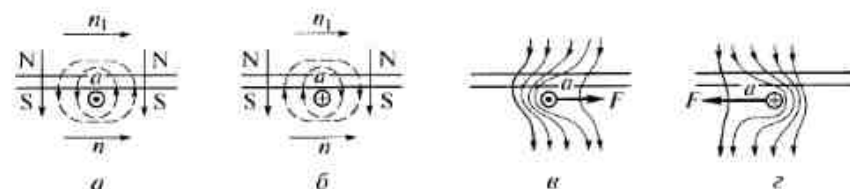


Рис. 4.4. Принцип работы асинхронной машины: *а* и *в* — в режиме двигателя; *б* и *з* — в режиме генератора

При этом направление вращения поля статора относительно ротора изменяется на обратное по сравнению с работой машины в режиме двигателя. Соответственно в проводнике a изменится направление ЭДС и тока i , следовательно, направление силы F (рис. 4.4, z). Таким образом, момент, развиваемый асинхронной машиной, становится тормозящим по отношению к вращающему моменту приводного двигателя. В этих условиях асинхронная машина работает генератором, преобразовывая механическую энергию, подводимую к ней от приводного двигателя, в электрическую, которую она отдает в сеть.

Теоретически можно как угодно сильно ускорять ротор относительно вращающегося магнитного потока; следовательно, при работе асинхронной машины генератором скольжение принимает значение от $s = 0$ до $s = -\infty$.

Работа в режиме электромагнитного тормоза. Если ротор асинхронной машины приводится во вращение против вращения магнитного поля статора (частоту вращения ротора в данных условиях следует считать отрицательной), то такой режим работы называется режимом электромагнитного тормоза. В этом случае к асинхронной машине подводится энергия с двух сторон — электрическая энергия из сети и механическая энергия от первичного двигателя. При этом скольжение $s = n_1 - (-n)/n_1 > 1$, оно изменяется от $s = +1$ при $n = 0$ и теоретически может достигать значения $s = +\infty$.

Работа асинхронной машины в режиме электромагнитного тормоза используется, например, в подъемно-транспортных устройствах (при опускании груза).

Из рассмотренных трех режимов работы асинхронной машины наибольшее значение имеет работа в режиме двигателя. Этому режиму работы уделяется главное внимание, поскольку режимы работы генератором и электромагнитным тормозом используются как специальные.

4.4. Основные соотношения.

Электромагнитный момент асинхронной машины

В асинхронной машине ротор вращается относительно магнитного поля с частотой $n_1 - n$. Поэтому наводимые в роторе ЭДС имеют частоту скольжения

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n)}{60} = \frac{pn_1(n_1 - n)}{60n_1} = f_1 s. \quad (4.3)$$

Допустим, что результирующий магнитный поток в зазоре машины постоянен ($\Phi = \text{const}$). Пусть E_2 — ЭДС, наводимая в обмот-

ке ротора, и $X_2 = 2\pi f_1 L_2$ — ее индуктивное сопротивление рассеяния при неподвижном роторе, т. е. при скольжении $s = 1$. Поскольку потоки рассеяния, определяющие индуктивность L_2 ротора, проходят в основном по воздуху, то $L_2 \approx \text{const}$. Следовательно, при вращении ротора индуктивное сопротивление X_2 и ЭДС определяются выражениями:

$$X_{2s} = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 s L_2 = X_2 s, \quad \text{а} \quad E_{2s} = \frac{E_2 f_2}{f_1} = E_2 s. \quad (4.4)$$

Следовательно,

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + (X_{2s})^2}}; \quad \cos \psi_2 = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (X_{2s})^2}}, \quad (4.5)$$

где R_2 — активное сопротивление обмотки ротора; ψ_2 — угол сдвига фаз между ЭДС E_{2s} и током I_2 .

Электромагнитный момент M на валу асинхронной машины создается в результате взаимодействия потока Φ , который согласно условию мы считаем постоянным, и активной составляющей тока в обмотке ротора $I_2 \cos \psi_2$.

Таким образом,

$$M = k_m \Phi I_2 \cos \psi_2 = \frac{k E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + (X_{2s})^2}} \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (X_{2s})^2}} = \frac{k E_2 s R_2}{R_2^2 + (X_{2s})^2}, \quad (4.6)$$

где k_m и k — коэффициенты пропорциональности.

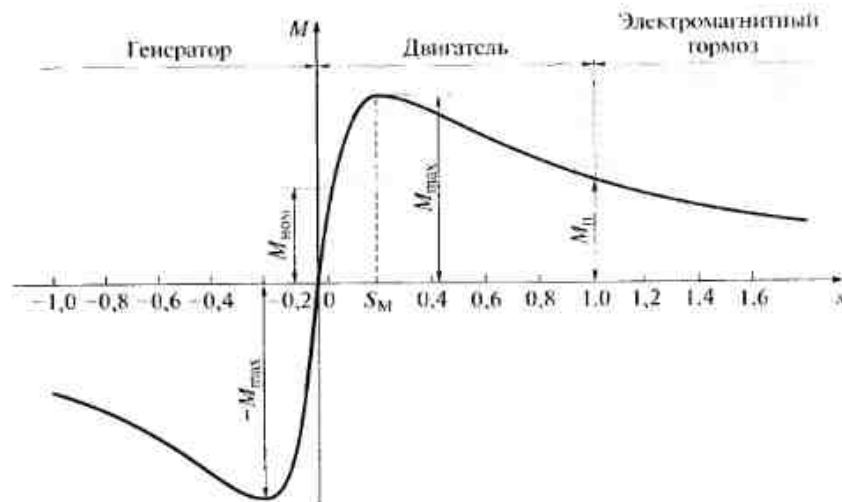


Рис. 4.5. Механическая характеристика асинхронной машины

Из выражения (4.6) следует, что при $s > 0$ (двигатель и электромагнитный тормоз) момент асинхронной машины M является положительным, т.е. вращающим, а при $s < 0$ — отрицательным (рис. 4.5), т.е. тормозящим (генератор), причем вращающий момент M тем меньше, чем больше угол ψ_2 .

4.5. Работа асинхронной машины при неподвижном роторе

При неподвижном роторе асинхронная машина представляет собой трансформатор, который отличается от трансформатора обычного исполнения только конструкцией (распределенная обмотка на статоре и роторе, наличие зазора и т. п.). Взаимодействие между статором и ротором асинхронной машины осуществляется так же, как между первичной и вторичной обмотками трансформатора, только посредством магнитных полей. Таким образом, физическая картина явлений в том и в другом случаях одинакова.

Рассмотрим предельные режимы работы машины — холостой ход и короткое замыкание. Выберем трехфазную асинхронную машину с фазным ротором. Фазы обмотки считаем симметричными, а вращающееся магнитное поле — близким к круговому.

Высшие гармонические ЭДС в основном подавляются благодаря распределению обмоток и укорочению шага, поэтому можно учитывать только первые гармонические статора и ротора, а, следовательно, все переменные величины считать синусоидальными функциями времени или пространства. Роль высших гармонических будет рассмотрена далее. Напряжения, ЭДС и токи определяются их действующими значениями, а МДС и потоки — их наибольшими значениями. Поскольку ротор неподвижен, обмотки статора и ротора пересекаются магнитным потоком с одинаковой частотой и, следовательно, частоты ЭДС статора f_1 и ротора f_2 равны по значению.

Холостой ход асинхронной машины при $n = 0$. Предположим, что ротор асинхронной машины разомкнут (рис. 4.6, положение контакта L) и неподвижен, а статор включен в сеть с напряжением U_1 и частотой f_1 . В этом случае асинхронная машина представляет собой трансформатор при холостом ходе. Первичной обмоткой является статор машины, а вторичной — неподвижный ротор. Соответственно все величины, относящиеся к статору,

будем называть первичными и обозначать индексом «1», а все величины, относящиеся к ротору, — вторичными и обозначать индексом «2».

Под действием приложенного напряжения \dot{U}_1 по обмотке статора протекает ток холостого хода \dot{I}_0 . Образованная этим током МДС \dot{F}_1 создает основной поток Φ_m , сцепленный с обмотками обеих частей машины, и поток рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$, сцепленный только с обмоткой статора. Если p — число пар полюсов машины, то частота вращения n_1 МДС \dot{F}_1 и соответственно потока Φ_m составляет

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}$$

Основной поток при неподвижном двигателе создает в обмотках статора и ротора ЭДС \dot{E}_1 и \dot{E}_2 , равные соответственно:

$$\dot{E}_1 = 4,44f_1w_1k_{\sigma\sigma 1}\dot{\Phi}_m; \quad \dot{E}_2 = 4,44f_1w_2k_{\sigma\sigma 2}\dot{\Phi}_m.$$

Отношение

$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{w_1k_{\sigma\sigma 1}}{w_2k_{\sigma\sigma 2}} = k_E$$

называют коэффициентом трансформации ЭДС. Для основных гармонических обмоточные коэффициенты приблизительно равны 0,9...0,96, поэтому можно считать, что $k_E = \frac{w_1}{w_2}$ (как в трансформаторах).

Поток рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ создает в обмотке статора ЭДС рассеяния $\dot{E}_{\sigma 1}$, причем

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_0X_1,$$

где X_1 — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора. Обмотка статора имеет также активное сопротивление R_1 , поэтому уравнение напряжений первичной обмотки асинхронной машины (с учетом падения напряжения в активном сопротивлении I_1R_1) имеет тот же вид, что и для первичной обмотки трансформатора:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_0R_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_0X_1 + \dot{I}_0R_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0Z_1, \quad (4.7)$$

где Z_1 — полное сопротивление обмотки статора, $Z_1 = R_1 + jX_1$.

Одинаковым уравнениям ЭДС первичной обмотки для трансформатора и асинхронной машины соответствуют принципиально одинаковые векторные диаграммы холостого хода (см. рис. 2.22). Однако ток холостого хода \dot{I}_0 в асинхронном двигателе вследствие наличия воздушного зазора между статором и ротором значительно

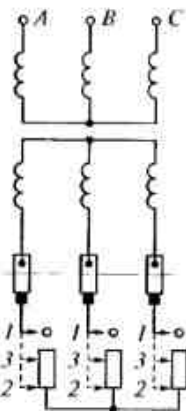


Рис. 4.6. Схема асинхронного двигателя с фазным ротором и реостатом:

1...3 — положение контакта

но больше, чем в трансформаторе, и составляет 20...40% (а в машинах малой мощности — до 60%) номинального тока. Большой ток холостого хода является одним из основных недостатков асинхронной машины, поскольку с ним связано увеличение потерь в обмотке статора и уменьшение коэффициента мощности ($\cos \varphi$). В целях снижения тока холостого хода воздушный зазор машины уменьшают до минимально возможного (с учетом надежности).

В асинхронных машинах, как и в трансформаторах, вторичную обмотку приводят к первичной, т. е. заменяют действительную вторичную обмотку другой, имеющей такое же число фаз и число витков, шаг обмотки и количество пазов на полюс и фазу, как и первичная. При этом параметры вторичной обмотки должны быть надлежащим образом пересчитаны, чтобы сохранить реальные энергетические соотношения в машине.

ЭДС приведенной вторичной обмотки

$$\dot{E}_2' = \dot{E}_2 k_f.$$

При разомкнутом неподвижном роторе в машине имеются только потери в меди статора $m_1 I_0^2 R_1$ (где m_1 — число фаз статора) и потери в стали статора и ротора $P_{c1} + P_{c2}$. На покрытие этих потерь расходуется мощность P_{10} , потребляемая машиной из сети. Таким образом,

$$P_{10} = m_1 I_0^2 R_1 + P_{c1} + P_{c2}.$$

Поскольку в асинхронных машинах ток I_0 и сопротивление R_1 относительно велики, то потери в меди P_{cu} составляют заметную часть мощности P_{10} , тогда как в трансформаторах ими можно пренебречь.

Зная значение P_{10} , можно определить активную составляющую тока I_{0a} :

$$I_{0a} = \frac{P_{10}}{m_1 U_1}.$$

Активная составляющая тока I_{0a} обычно невелика по сравнению с реактивной составляющей этого тока I_{0r} , и угол $\varphi_0 = 70 \dots 80^\circ$.

Схема замещения асинхронной машины при холостом ходе не отличается от соответствующей схемы трансформатора.

Короткое замыкание асинхронной машины при $n = 0$. Для перехода в режим короткого замыкания нужно переместить подвижный контакт ротора в цепи ротора из положения 1 в положение 2 (см. рис. 4.6). Физическая сущность явлений при коротком замыкании асинхронной машины практически та же, что и в трансформаторе. Отличие процессов определяется особенностями конструкции асинхронной машины. Поскольку установившийся ток

короткого замыкания двигателя I_k в 4—7 раз превышает его номинальный ток $I_{ном}$, во избежание чрезмерного нагрева и повреждения изоляции обмоток опыт короткого замыкания асинхронного двигателя проводят при пониженном напряжении: к двигателю подводят такое напряжение U_k (15...25% U_n), при котором $I_k = I_{ном}$. Токи \dot{I}_1 и \dot{I}_2 создают МДС статора и ротора. Рассмотрим первые гармонические МДС статора и ротора \dot{F}_1 и \dot{F}_2 . При $n = 0$ частота тока в роторе равна частоте тока в статоре f_1 . МДС \dot{F}_1 и \dot{F}_2 вращаются относительно неподвижных статора и ротора в одинаковом направлении с одинаковыми частотами $n_1 = = f_1/p$ (p — число пар полюсов машины), т. е. они неподвижны относительно друг друга и образуют результирующую (вращающуюся с частотой n_1) МДС \dot{F}_k , которая создает основной вращающийся поток Φ_k , сцепленный с обмотками статора и ротора. Кроме того, МДС \dot{F}_1 создает первичный поток рассеяния Φ_{c1} , сцепленный только с первичной обмоткой, а МДС \dot{F}_2 — вторичный поток рассеяния Φ_{c2} , сцепленный только со вторичной обмоткой (рис. 4.7). Как и в трансформаторе, МДС \dot{F}_1 и \dot{F}_2 при коротком замыкании действуют навстречу друг другу. Поэтому результирующая МДС \dot{F}_k и поток Φ_k при коротком замыкании относительно малы и, следовательно, основная магнитная цепь не насыщена. В большинстве случаев можно считать, что $\Phi_k = 0$ и, следовательно, МДС \dot{F}_1 и \dot{F}_2 при коротком замыкании находятся во взаимном равновесии, т. е.

$$\dot{F}_1 = -\dot{F}_2, \quad \text{или} \quad \dot{F}_1 + \dot{F}_2 = 0, \quad (4.8)$$

где \dot{F}_1 и \dot{F}_2 определяются по формулам (3.32). Следовательно,

$$\frac{0,45 m_1 \dot{I}_1 w_1 k_{об1}}{p} + \frac{0,45 m_2 \dot{I}_2 w_2 k_{об2}}{p} = 0.$$

Отсюда найдем коэффициент трансформации токов

$$k_I = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \frac{m_1 w_1 k_{об1}}{m_2 w_2 k_{об2}}$$

и приведенный ток ротора

$$\dot{I}_2' = \frac{\dot{I}_2}{k_I}. \quad (4.9)$$

В отличие от трансформаторов в асинхронных двигателях $k_k \neq k_I$, так как в общем случае $m_1 \neq m_2$ (лишь в двигателях с фазным рото-

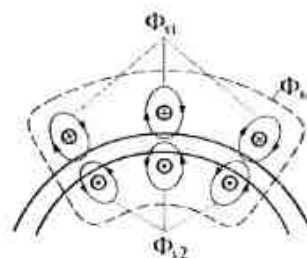


Рис. 4.7. Поток асинхронной машины при коротком замыкании

ром, для которых $m_1 = m_2$, эти коэффициенты равны). Для двигателей с короткозамкнутым ротором в пределах одной пары полюсов каждый стержень обмотки рассматривают как одну фазу, т.е. $m_2 = Z_2/p$, следовательно, число витков одной фазы такой обмотки $w_2 = 0,5$, фазы сдвинуты одна относительно другой на угол $\alpha = 2\pi p/Z_2$, а $k_{\text{об2}} = 1$.

Приведенные сопротивления ротора определяют исходя из энергетической эквивалентности приведенной и реальной асинхронной машины, что означает равенство потерь в обмотках (в данном случае ротора) и фазовых сдвигов (в данном случае между ЭДС E_2 и током I_2). Приравняв потери в обмотках ротора ($m_2 I_2^2 R_2 = m_1 I_2'^2 R_2'$), находим

$$R_2' = R_2 \frac{m_2 I_2^2}{m_1 I_2'^2} = R_2 \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{m_1 w_1 k_{\text{об1}}}{m_2 w_2 k_{\text{об2}}} \right)^2 = R_2 k_t k_l = R_3 k,$$

где k — коэффициент трансформации асинхронной машины, $k = k_t k_l$.

Приравняв фазовые сдвиги ($\text{tg } \psi_2 = \frac{X_2}{R_2} = \frac{X_2'}{R_2'}$), получаем

$$X_2' \frac{R_2'}{R_2} X_2 = k X_2.$$

Уравнения первичной и вторичной ЭДС имеют такой же вид, как и для трансформаторов:

$$\dot{U}_k = -\dot{E}_k + \dot{I}_k Z_k \quad \text{и} \quad 0 = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2', \quad \text{или} \quad \dot{E}_2' = \dot{I}_2' Z_2',$$

где Z_2' — полное приведенное сопротивление обмотки ротора, $Z_2' = R_2' + jX_2'$. Соответственно схема замещения для короткозамкнутой асинхронной машины имеет тот же вид, что и для трансформатора, и те же параметры короткого замыкания:

$$R_k = R_1 + R_2' \quad \text{и} \quad X_k = X_1 + X_2'. \quad (4.10)$$

В отличие от трансформаторов параметры R_k и X_k асинхронных машин не всегда постоянны. Например, в глубоководных двигателях они зависят от частоты, а в машинах с закрытыми пазами X_k зависит от величины тока.

По значению активного сопротивления короткого замыкания R_k можно определить мощность, потребляемую машиной при коротком замыкании P_k , которая практически полностью затрачивается на покрытие потерь в обмотках статора и ротора, т.е.

$$P_k = P_{\text{ст}} + P_{\text{рот}} = m_1 I_1^2 R_k.$$

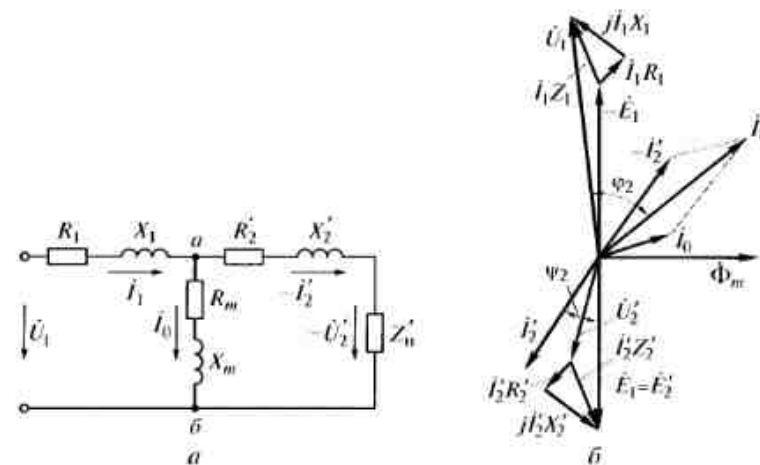


Рис. 4.8. Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) асинхронной машины при заторможенном роторе

Работа заторможенной асинхронной машины при нагрузке. Если переместить подвижный контакт реостата в цепи заторможенного ротора в положение 3 (см. рис. 4.6), то асинхронную машину можно рассматривать как трансформатор под нагрузкой. Соответственно уравнения равновесия напряжения и ЭДС, МДС, схема замещения и векторная диаграмма (рис. 4.8) имеют такой же вид, что и в трансформаторах. Таким образом,

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1; & \dot{U}_2' &= \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2'; \\ \dot{F}_1 + \dot{F}_2 &= \dot{F}_m; & \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + (-\dot{I}_1'), \end{aligned} \quad (4.11)$$

где \dot{F}_2 , \dot{E}_2' , $Z_2' = R_2' + jX_2'$ и $\dot{U}_2' = \dot{I}_2' Z_2'$ — приведенные к обмотке статора ток, ЭДС, сопротивление ротора и вторичное напряжение, равное падению напряжения на некоторой активной нагрузке, подключенной на зажимы неподвижного ротора (для случая двигателя обычно $Z_2' = R_2'$).

МДС \dot{F}_1 , \dot{F}_2 и \dot{F}_m вращаются в одном направлении и с одинаковой частотой n_1 , причем \dot{F}_2 сдвинута относительно \dot{F}_1 на такой угол, что $\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_m$. Равенство частот вращения определяет равенство числа полюсов статора (p_1) и ротора (p_2).

Хотя асинхронная машина с заторможенным ротором работает аналогично трансформатору, она дороже трансформатора и ее эксплуатационные характеристики (большой ток холостого хода, меньший КПД и др.) хуже. Эти обстоятельства определяют ее использование для трансформации напряжения лишь в специальных устройствах: фазорегуляторах, индукционных регуляторах и пр.

4.6. Асинхронные машины специального назначения

Фазорегулятор. Если фазный ротор трехфазной асинхронной машины установить так, чтобы оси одноименных фаз ротора и статора совпадали, то вращающийся магнитный поток пересекает обмотки статора и ротора одновременно. Следовательно, ЭДС E_1 и E_2 имеют одинаковую фазу. Если повернуть ротор навстречу магнитному потоку на некоторый угол α , то магнитный поток будет сначала набегать на фазу ротора (например, a), а затем на фазу A статора. Вследствие этого ЭДС E_2 будет опережать E_1 по фазе на угол θ . Поворачивая ротор в ту или иную сторону, можно получить требуемую фазу ЭДС. На ротор фазорегулятора действует значительный электромагнитный момент, для преодоления которого используют червячный редуктор с самоторможением.

Асинхронные фазорегуляторы (рис. 4.9) применяют главным образом в схемах автоматики для компенсации фазовой погрешности, в управляемых выпрямителях, устройствах для испытаний электроизмерительных приборов и пр.

Индукционный регулятор. Индукционный регулятор применяют для регулирования трехфазного переменного напряжения сетей. Он позволяет плавно регулировать напряжение под нагрузкой в достаточно широких пределах. Класс нагревостойкости лаковой изоляции ограничивает применение индукционных регуляторов (обычно для сетей с напряжением до 18 кВ). Трехфазные индукционные регуляторы выполняются с регулированием напряжения до $\pm (50 \dots 60) \%$.

Обмотка статора соединена с фазной обмоткой заторможенного ротора по схеме автотрансформатора (рис. 4.10, *a*), причем первичной считают включенную в сеть обмотку ротора. Вращающееся магнитное поле, созданное током этой обмотки, наводит в ней ЭДС E_1 и во вторичной обмотке (статора) ЭДС E_2 , совпадающие по фазе и одинаково направленные относительно обмоток. При холостом ходе для каждой фазы этой машины

$$\dot{U}_{\max} = \dot{E}_1 + \dot{E}_2 = \dot{U}_{\text{вх}} + \dot{E}_2.$$

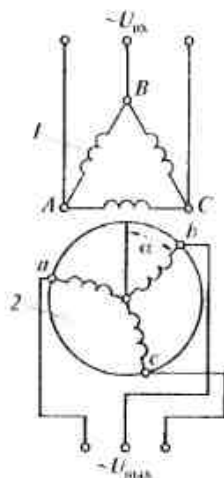


Рис. 4.9. Схема фазорегулятора:
1 — обмотка статора; 2 — обмотка ротора

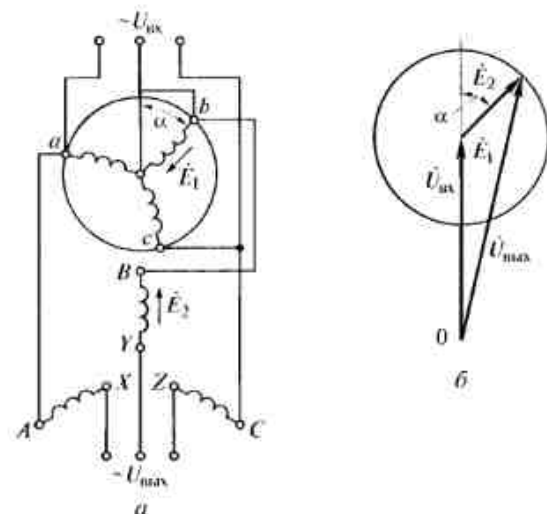


Рис. 4.10. Схема (*a*) и векторная диаграмма напряжений (*б*) трехфазного индукционного регулятора

Поскольку векторы $\dot{U}_{\text{вх}}$ и \dot{E}_2 складываются геометрически, то действующее значение выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ зависит от угла сдвига фаз α между векторами $\dot{U}_{\text{вх}}$ и \dot{E}_2 , т. е. от угла взаимного сдвига осей фаз обмоток статора и ротора. Этот угол можно изменить, поворачивая ротор и получая соответственно различные значения выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ (рис. 4.10, *б*). При повороте ротора концы векторов $\dot{U}_{\text{вых}}$ и \dot{E}_2 перемещаются по окружности. Минимальному и максимальному напряжениям $U_{\text{вых}}$ соответствуют углы поворота $\alpha = 0$ и 180° , т. е.

$$U_{\text{вых, min}} = U_{\text{вх}} - E_2; \quad U_{\text{вых, max}} = U_{\text{вх}} + E_2.$$

Первичная обмотка может быть соединена как по схеме звезда, так и по схеме треугольник. Поворот и фиксация ротора осуществляется так же, как и в фазорегуляторе.

В рассматриваемом индукционном регуляторе одновременно с изменением величины выходного напряжения изменяется и его фаза. Если такое изменение нежелательно, то применяют двоярный регулятор, представляющий собой соединение двух одиночных регуляторов, оба ротора которых расположены на одном валу, а их обмотки соединены между собой параллельно. Обмотки статоров соединены последовательно так, чтобы магнитные поля в обоих регуляторах вращались в противоположных направлениях (тогда суммарный вращающийся момент на валу двоярного регулятора будет равен нулю). В результате при повороте двоярного ротора в каком-либо направлении ротор одного регулятора пово-

рачивается по направлению вращения, а другого — в противоположном направлении. Аналогично поворачиваются и соответствующие векторы вторичных ЭДС, поэтому фаза выходного напряжения будет оставаться неизменной.

4.7. Работа асинхронной машины при вращающемся роторе

Уравнение равновесия напряжения и ЭДС статора. Как и ранее, будем рассматривать только первые гармонические переменных величин — напряжений, токов и других параметров, так как они определяют основные процессы в асинхронной машине. Кроме того, предположим, что статор асинхронной машины включен в сеть с заданным напряжением U_1 и постоянной частотой f_1 . Основной поток Φ_m , вращающийся с частотой $n_1 = 60f_1/p$, создает в обмотке статора основную ЭДС \dot{E}_1 . В той же обмотке первичный поток рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ индуцирует ЭДС рассеяния $\dot{E}_{\sigma 1} = -jI_1 X_1$. Если учесть активное сопротивление обмотки статора R_1 , то, очевидно, что в статоре асинхронной машины при вращении ротора действуют те же ЭДС, что и в машине с заторможенным ротором. Соответственно этому уравнение равновесия напряжений и ЭДС для цепи статора аналогично уравнению (4.11)

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + I_1 Z_1 \quad (4.12)$$

Уравнение МДС и токов асинхронной машины. Если обмотка ротора замкнута, по ней проходит ток с частотой f_2 , который создает МДС F_2 , вращающуюся относительно ротора с частотой

$$n_2 = \frac{60f_2}{p} = \frac{60f_1 s}{p} = n_1 s = n_1 - n.$$

Поскольку ротор вращается с частотой n , то частота вращения МДС ротора относительно статора равна сумме частот $n + n_2 = n_1$. Следовательно, при вращении ротора МДС статора \dot{F}_1 и МДС ротора \dot{F}_2 вращаются в пространстве всегда (независимо от режима работы) в одном направлении и с одинаковой частотой, т.е. неподвижны друг относительно друга, и создают общую вращающуюся синусоидальную волну МДС \dot{F}_m . Отсюда следует, что выводы, полученные для заторможенного ротора, о взаимодействии токов в первичной и вторичной обмотках справедливы и для вращающегося ротора, т.е.

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_m \quad \text{и} \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_r + (-\dot{I}_2).$$

Причем, пока машина работает в режиме двигателя, частота вращения n_2 положительная, т.е. МДС ротора вращается в ту же

сторону, что и ротор. При работе машины генератором или тормозом частота вращения n_2 отрицательная, т.е. МДС ротора вращается в сторону, противоположную вращению ротора.

ЭДС и сопротивления обмотки ротора. Если в цепь фазного ротора введено активное сопротивление, что соответствует эксплуатационным условиям работы асинхронной машины с контактными кольцами, то активное сопротивление цепи ротора будет $R_{2\mu} = R_2 + R_{\mu}$, где R_2 — активное сопротивление обмотки ротора; R_{μ} — добавочное сопротивление, включенное в цепь ротора через контактные кольца.

Если не учитывать изменения активного сопротивления обмотки вследствие явления вытеснения тока в проводниках обмотки ротора и в связи с изменением ее температуры, то можно считать, что $R_2 = \text{const}$ и приведенное к обмотке статора сопротивление $R'_2 = \text{const}$. Индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора в соответствии с (4.4), равно

$$X'_2 = X'_2 s.$$

Уравнение ЭДС ротора и ток ротора. Предположим, что в цепь вращающегося ротора введено сопротивление R_{μ} , падение напряжения на котором будет равно U_2 . В замкнутой цепи ротора протекает ток I_2 , создающий поток рассеяния $\Phi_{\sigma 2}$ и встречающий сопротивление R_2 . Соответственно в обмотке ротора помимо ЭДС $\dot{E}_{2\mu}$, создаваемой основным потоком Φ_m , существует и ЭДС рассеяния $\dot{E}_{\sigma 2}$, и уравнение равновесия напряжения и ЭДС принимает следующий вид

$$\dot{E}_{2\mu} + \dot{E}_{\sigma 2} = \dot{E}_{2\mu} - jI_2 X_{2\sigma} = I_2 (R_2 + R_{\mu}),$$

или

$$\dot{E}_{2\mu} - jI_2 X_{2\sigma} - I_2 (R_2 + R_{\mu}) = \dot{E}_{2\mu} - I_2 Z_2 - I_2 R_{\mu} = 0. \quad (4.13)$$

В асинхронной машине с обмоткой ротора, приведенной к обмотке статора, это уравнение имеет вид

$$\dot{E}'_{2\mu} - jI'_2 X'_{2\sigma} - I'_2 R'_2 = \dot{E}'_{2\mu} - I'_2 Z'_2 - I'_2 R'_{\mu} = 0,$$

где Z'_2 — полное сопротивление приведенного ротора, $Z'_2 = R'_2 + jX'_{2\sigma}$.

В отсутствие добавочного сопротивления R_{μ} (или в случае короткозамкнутого асинхронного двигателя, когда $U_2 = 0$) из выражения (4.13) можно получить

$$I_2 = \frac{\dot{E}_{2\mu}}{R_2 + jX_{2\sigma}} \quad \text{и} \quad I_2 = \frac{E_2 s}{\sqrt{R_2^2 + (X_{2\sigma})^2}}. \quad (4.14)$$

Используя соотношения (4.4), преобразуем выражение (4.14) к виду

$$I_2 = \frac{\dot{E}_2 s}{R_2 + jX_2} \quad (4.15)$$

или, сократив на множитель s ,

$$I_2 = \frac{\dot{E}_2}{R_2/s + jX_2} \quad \text{и} \quad I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2/s)^2 + X_2^2}} \quad (4.16)$$

а

$$I_2' = \frac{E_2'}{R_2'/s + jX_2'} \quad \text{и} \quad I_2' = \frac{E_2'}{\sqrt{(R_2'/s)^2 + X_2'^2}} \quad (4.17)$$

для машины с приведенным ротором.

4.8. Энергетическая диаграмма асинхронной машины

При работе асинхронной машины в двигательном режиме (рис. 4.11) к статору из сети подводится электрическая мощность

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1.$$

Часть этой мощности затрачивается на покрытие электрических потерь $P_{\text{эл}}$ в активном сопротивлении обмотки статора и магнитных потерь $P_{\text{с1}}$ в статоре. Остальная мощность, называемая электромагнитной и равная

$$P_{\text{эм}} = P_1 - P_{\text{эл}} - P_{\text{с1}},$$

передается в ротор посредством вращающегося магнитного поля. Часть ее расходуется на покрытие электрических потерь $P_{\text{эл2}}$ в обмотке ротора. В машинах с фазным ротором возникают также потери в щеточных контактах на кольцах, которые обычно включают в потери $P_{\text{м2}}$. Оставшаяся часть мощности $P_{\text{м}}$ превращается в механическую мощность

$$P_{\text{м}} = P_{\text{эм}} - P_{\text{эл2}}. \quad (4.18)$$

Магнитные потери в стали ротора $P_{\text{с2}}$ практически отсутствуют вследствие малой частоты перемagnитывания. Полезную мощность на валу двигателя определяют по следующей формуле:

$$P_2 = P_{\text{м}} - P_{\text{мех}} - P_{\text{воб}}.$$

К механическим потерям относят потери от трения в подшипниках, контактных колец о щетки и вентиляционные. Добавочные потери состоят из так называемых пульсационных и поверхностных потерь, возникающих в зубцах статора и ротора при вращении последнего, вследствие пульсаций проходящего в зубцы потока, а также потерь, обусловленных высшими гармоническими МДС при нагрузке. КПД асинхронного двигателя $\eta = P_2/P_1 = P_2/(P_2 + \sum P)$, где $\sum P$ — сумма всех потерь в машине.

Из выражения (4.18) следует, что

$$P_{\text{эл2}} = P_{\text{эм}} - P_{\text{м}}. \quad (4.19)$$

Выразим электромагнитную и механическую мощности через электромагнитный вращающий момент M :

$$P_{\text{эм}} = M\omega_1; \quad P_{\text{м}} = M\omega, \quad (4.20)$$

где ω_1 и ω_2 — угловые скорости магнитного поля и ротора, $\omega_1 = 2\pi n_1/60$ и $\omega = 2\pi n/60$.

Подставляя равенство (4.20) в формулу (4.19), получаем

$$P_{\text{эл2}} = M\omega_1 - M\omega = \frac{M\omega_1(\omega_1 - \omega)}{\omega_1} = M\omega_1 s = P_{\text{эм}} s, \quad (4.21)$$

откуда скольжение

$$s = \frac{P_{\text{эл2}}}{P_{\text{эм}}}.$$

Соотношение (4.21) показывает, что увеличение скольжения приводит к росту электрических потерь в обмотке ротора и соответственно к снижению КПД. Поэтому стремятся, чтобы $s_{\text{ном}} = 0,01 \dots 0,07$, а обмотку ротора выполняют с небольшим активным сопротивлением.

Следует отметить, что независимо от режима работы (и направления электромеханического преобразования) асинхронная машина всегда потребляет из сети и реактивную мощность, необходимую для образования основного магнитного потока и полей рассеяния.

4.9. Схемы замещения асинхронной машины

В инженерных расчетах удобнее рассматривать не реальную асинхронную машину, представляющую собой систему электромагнитно связанных контуров, а эквивалентную схему замещения, созданной аналогично схеме замещения трансформатора. Для по-

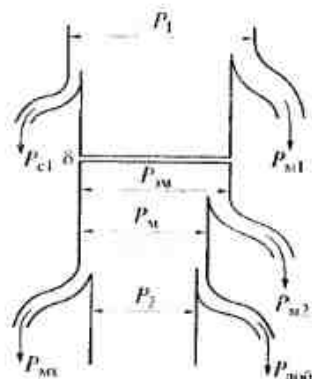


Рис. 4.11. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

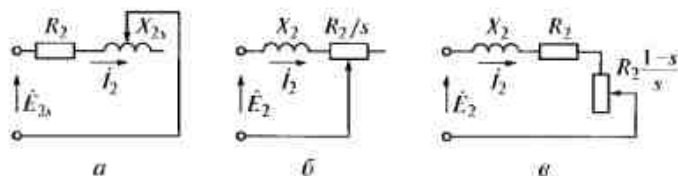


Рис. 4.12. Схемы замещения ротора асинхронной машины: а — для вращающегося ротора; б и в — для неподвижного ротора;

строения схем замещения проанализируем физический смысл выражений (4.15) и (4.16).

Ток I_2 , определяемый выражением (4.15), имеет частоту скольжения f_2 соответственно ЭДС $\dot{E}_2 s$, а ток \dot{I}_2 , определяемый выражением (4.16), имеет частоту ЭДС \dot{E}_2 при неподвижном роторе, т.е. частоту питающей сети f_1 . Индуктивное сопротивление X_2 также соответствует неподвижному ротору, а активное сопротивление равно R_2/s . Другими словами, все происходит так, как если бы ротор представлял собой неподвижный контур с сопротивлениями R_2/s и X_2 , к которому подведена ЭДС \dot{E}_2 . Такой контур эквивалентен реальному ротору.

Уравнениям (4.15) и (4.16) соответствуют схемы замещения ротора, представленные на рис. 4.12. Анализ схем замещения ротора показывает, что в первом случае (рис. 4.12, а) электрическая мощность ротора

$$P_{a2} = m_2 I_2^2 R_2,$$

а во втором случае (рис. 4.12, б) потребляемая мощность

$$P_u = m_2 I_2^2 \frac{R_2}{s}.$$

Поскольку отношение мощности P_{a2} к мощности P_u равно s , то в соответствии с уравнением (4.21) P_u — электромагнитная мощность, подводимая от статора к ротору.

Выделим из активного сопротивления вторичного контура R_2/s сопротивление неподвижного ротора R_2 :

$$\frac{R_2}{s} - R_2 = \frac{R_2(1-s)}{s}.$$

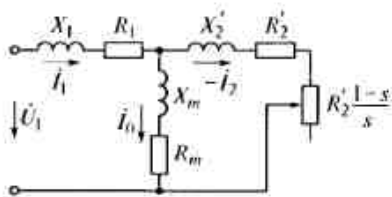


Рис. 4.13. Т-образная схема замещения асинхронной машины

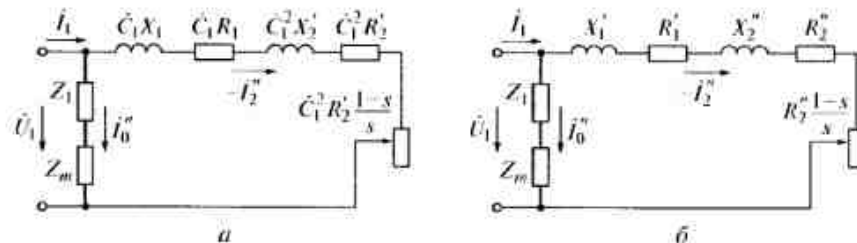


Рис. 4.14. Г-образные схемы замещения асинхронной машины: а — точная; б — уточненная ($C_1 = c_1$); в — упрощенная ($c_1 = 1$)

Таким образом, полное сопротивление вторичного контура можно представить в виде суммы: сопротивления неподвижного ротора $R_2 + jX_2$ и активного добавочного сопротивления $R_n = R_2 \frac{1-s}{s}$, зависящего от частоты вращения ротора. В этом случае схема замещения имеет вид, приведенный на рис. 4.12, в. Анализ этой схемы показывает, что величина $I_2^2 R_n$ эквивалентна мощности, которую развивает асинхронная машина при вращении. Действительно,

$$P_u = P_m - P_{a2} = m_2 I_2^2 \frac{R_2}{s} - m_2 I_2^2 R_2 = m_2 I_2^2 R_2 \frac{1-s}{s}. \quad (4.22)$$

В режиме двигателя ($1 \geq s \geq 0$) R_n положительно (и $I_2^2 R_n > 0$), что соответствует преобразованию электрической энергии, подаваемой из сети в механическую, а в режиме генератора ($-\infty \leq s \leq 0$) R_n отрицательно (и $I_2^2 R_n < 0$), т.е. подаваемая с вала механическая энергия преобразуется в электрическую.

Полная схема замещения асинхронной машины при вращающемся роторе, приведенном к статору, изображена на рис. 4.13. По существу, она аналогична Т-образной схеме замещения трансформатора. Для упрощения расчетов Т-образную схему замещения асинхронных машин, состоящую из трех взаимно связанных между собой цепей, преобразуют в Г-образную схему замещения, которая состоит из двух независимых цепей, параллельно включенных на напряжение сети (рис. 4.14, а). Таким образом, ветвь намагничивания с током I_0 выносятся на зажимы внешней сети с напряжением U_1 . При этом сопротивление ветви намагничивания Г-образной схемы замещения берется равным $Z_m + Z_1$, а ток рабочей цепи

$I_2'' = I_2' / \dot{C}_1$. Изменяются и параметры рабочей цепи. Появившийся в этой схеме замещения комплексный коэффициент $\dot{C}_1 = 1 + Z_1 / Z_m$ на практике заменяют модулем $\dot{C}_1(c_1)$, который для асинхронных двигателей мощностью более 10 кВт равен 1,02... 1,05. Это возможно, поскольку активными сопротивлениями можно пренебречь по сравнению с индуктивными, и $\dot{C}_1 \approx 1 + X_1 / X_m = c_1$. В этом случае точная Г-образная схема замещения преобразуется в уточненную Г-образную схему замещения (рис. 4.14, б), в которой $R_1' = c_1 R_1$, $X_1' = c_1 X_1$, $R_2'' = c_1^2 R_2'$, а $X_2'' = c_1^2 X_2'$. В ряде случаев принимают $c_1 = 1$ и получают упрощенную Г-образную схему замещения (рис. 4.14, в), в которой $I_0'' = I_0$, $R_1' = R_1$, $X_1' = X_1$, $R_2'' = R_2'$, а $X_2'' = X_2'$.

4.10. Вращающие моменты асинхронной машины

Асинхронный двигатель при установившемся режиме работы ($n = \text{const}$) преодолевает нагрузочный момент M_m , состоящий из тормозного момента при холостом ходе M_0 и полезного тормозного момента M_2 . Следовательно, электромагнитный (вращающий) момент M , развиваемый на роторе двигателя, при неизменной частоте вращения имеет две составляющие, каждая из которых находится в равновесии с соответствующей составляющей тормозного момента. Таким образом,

$$M = M_0 + M_2 = M_{c1},$$

где

$$M_0 = \frac{P_{\text{вх}} + P_{\text{воб}}}{\omega} = \frac{P_{\text{вх}} + P_{\text{воб}}}{2\pi n}, \quad \text{а} \quad M_2 = \frac{P_2}{\omega} = \frac{P_2}{2\pi n}. \quad (4.23)$$

M_{c1} — статический момент двигателя; P_2 — полезная (отдаваемая двигателем) механическая мощность; n — частота вращения ротора двигателя.

Из выражений (4.20) получаем

$$P_{c1} = \frac{P_{\text{вх}} \omega}{\omega_1} = \frac{P_{\text{вх}} n}{n_1} = (1 - s) P_{\text{вх}}. \quad (4.24)$$

Равенство (4.21) показывает, что потери в меди вторичной цепи или в общем случае электрическая мощность, развиваемая во вторичной цепи, равна электромагнитной мощности P_m , умноженной на скольжение. Таким образом, электромагнитная мощность P_m распределяется на составляющие P_1 и $P_{\text{в2}}$, определяемые в зависимости от скольжения равенствами (4.24) и (4.21). Из соотношения (4.21) получаем (считая, что ротор приведен к статору) еще одно выражение для величины электромагнитного момента:

$$M = \frac{P_{\text{в2}}}{\omega_1 s}, \quad (4.25)$$

или

$$M = \frac{P_{\text{в2}}}{2\pi n_1 s} = \frac{m_1 I_2'^2 R_2'}{2\pi n_1 s} = \frac{m_1 I_2'^2 R_2' / s}{2\pi n_1} = \frac{m_1 I_2''^2 R_2'' / s}{2\pi n_1},$$

где ток I_2'' можно найти по уточненной Г-образной схеме замещения

$$I_2'' = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1' + R_2''/s)^2 + (X_1' + X_2'')^2}}. \quad (4.26)$$

Тогда

$$M = \frac{m_1 U_1^2 R_2'' / s}{2\pi n_1 [(R_1' + R_2''/s)^2 + (X_1' + X_2'')^2]}. \quad (4.27)$$

а для машин мощностью более 10 кВт ($c_1 = 1$)

$$M = \frac{m_1 U_1^2 R_2' / s}{2\pi n_1 [(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2]}. \quad (4.28)$$

Гистерезисный момент вращения. Магнитные потери в стали ротора состоят из потерь на гистерезис P_1 и потерь на вихревые токи P_m . Потери на гистерезис изменяются пропорционально частоте перемагничивания ротора $f_2 = f_1 s$, а потери на вихревые токи пропорциональны квадрату этой частоты. Обозначив значения этих потерь при неподвижном роторе соответственно P_{10} и P_{m0} (при $\Phi_m = \text{const}$), получаем

$$P_1 = s P_{10} \quad \text{и} \quad P_m = s^2 P_{m0}.$$

Этим потерям, как и потерям в меди ротора $P_{\text{в2}}$, соответствуют свои электромагнитные вращающие моменты. Действительно, вихревые токи возникают под действием ЭДС, индуцированной вращающимся полем, в листах стали ротора и по своей природе принципиально не отличаются от токов в обмотке ротора. Изменение магнитного поля в роторе (вследствие гистерезиса в стали ротора) запаздывает. Следовательно, при двигательном режиме

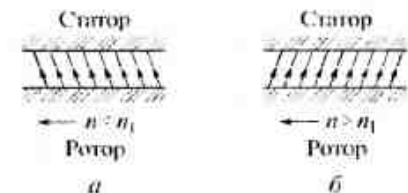


Рис. 4.15. Образование гистерезисного момента вращения в режиме двигателя (а) и генератора (б)

направление линий магнитной индукции в воздушном зазоре не будет радиальным, а будет отклоняться на поверхности ротора против направления вращения (рис. 4.15), вследствие чего создается вращающий момент, действующий в сторону вращения, т.е. положительный. В режиме генератора знак гистерезисного момента изменяется на обратный. В соответствии с (4.25) гистерезисный момент M_h и момент вращения от вихревых токов $M_{вт}$ равны

$$M_h = \frac{P_1}{\omega_1 s} = \frac{P_{r0}}{\omega_1} \quad \text{и} \quad M_{вт} = \frac{P_{вт}}{\omega_1 s} = \frac{s P_{вт0}}{\omega_1}.$$

Таким образом, величина гистерезисного момента M_h не зависит от скольжения. Этот момент при $\Phi_m = \text{const}$ является постоянным по значению и лишь изменяет свой знак при $s = 0$. Момент вихревых токов $M_{вт}$ изменяется пропорционально скольжению. Оба момента действуют на ротор таким же образом, как и основной электромагнитный момент, и поэтому являются полезными моментами. Однако вследствие малости оба эти момента в нормальных асинхронных машинах не учитывают. Они играют важную роль для пуска и вытягивания в синхронизм в так называемых гистерезисных двигателях. Эти вопросы более подробно изложены в учебниках по микромашинам.

Асинхронный вращающий момент. Кроме главного или основного момента, создаваемого первыми гармоническими потока, и тока в асинхронном двигателе существует ряд добавочных (паразитных) моментов, которые могут при определенных условиях нарушать (или даже сделать невозможной) работу двигателя. Высшие гармонические МДС (за исключением 3-й и кратных ей) создают вращающиеся магнитные поля. Но частота вращения этих полей меньше, чем основного, так как если поле первой гармонической МДС вращается с частотой $n_1 = 60f_1/p$, то для 5-й гармонической МДС $n_5 = 60f_1/5p$, для 7-й гармонической $n_7 = 60f_1/7p$ и т.д. Кроме того, 7-я гармоническая МДС вращается в ту же сторону, что и основная, а 5-я гармоническая — в противоположную сторону относительно последней. Рассмотрим вращающийся момент, создаваемый 7-й гармонической МДС (так называемый асинхронный момент). Поскольку ее поле вращается в ту же сторону, что и основное поле, то при пуске двигателя 7-я гармоническая МДС создает момент, направленный согласно с моментом основного поля. В дальнейшем момент 7-й гармонической претерпевает те же изменения, что и момент основной гармонической, но в более узких пределах скольжения. Когда ротор достигает частоты $n_1/7$, то он вращается с синхронной частотой 7-й гармонической МДС, и момент, развиваемый 7-й гармонической МДС, равен нулю. При дальнейшем увеличении частоты вращения ротор начнет обгонять поле 7-й гармонической, соответственно чему развиваемый ею момент становится отрицательным. В результате этого в механи-

ческой характеристике (подразд. 4.10) появляется провал. Если он настолько велик, что вращающий момент двигателя окажется недостаточным для преодоления нагрузочного момента, то двигатель будет вращаться с частотой, примерно равной 1/7 номинальной. При этом ток будет значительно выше номинального.

Синхронный вращающий момент. Этот момент появляется в результате взаимодействия двух высших гармонических одинакового порядка (ν), одна из которых создана током статора I_1 частоты f_1 , а вторая — током ротора I_2 , изменяющимся с частотой $f_2 = sf_1$. Синхронный момент статорной и роторной гармоник возникает только в том случае, когда они взаимно неподвижны. Вследствие действия синхронного момента ротор двигателя может «застрять» во время пуска на некоторой скорости, не достигнув номинальной. Однако в отличие от асинхронного момента, который проявляется в сравнительно большом диапазоне угловых скоростей, синхронный момент действует при пуске весьма кратковременно и может быть легко преодолен за счет кинетической энергии, запасенной во вращающемся роторе. Во избежание значительных синхронных моментов необходимо, чтобы $z_1 \neq z_2$ и $z_1 - z_2 \neq \pm 2p$ (z_1 и z_2 — число пазов на статоре и роторе соответственно). Для ослабления вредного влияния синхронных моментов делают снос пазов на роторе.

4.11. Механические характеристики асинхронной машины

Большое значение для оценки свойств асинхронной машины имеет механическая характеристика — зависимость частоты вращения ротора n от вращающего момента M , т.е. $n = f(M)$, или $M = f(n)$. Поскольку для асинхронной машины скольжение s является одним из определяющих параметров, связанным с частотой вращения соотношением $n = n_1(1 - s)$, то в теории асинхронных двигателей принято рассматривать механическую характеристику как зависимость $M = f(s)$, построенную при постоянстве приложенного к обмотке статора напряжения U_1 и частоты сети f_1 .

Естественные механические характеристики асинхронной машины (добавочное сопротивление в цепи ротора $R_a = 0$). В момент включения двигателя в сеть $n = 0$ и $s = +1$. Двигатель развивает начальный пусковой момент M_n , который можно определить, подставив в выражение (4.28) $s = 1$:

$$M_n = \frac{m_1 U_1^2 R_2' / s}{2\pi n_1 [(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2]}, \quad (4.29)$$

где $(R_1 + R_2') = R_k$, $(X_1 + X_2') = X_k$ — полное индуктивное сопротивление короткого замыкания, определяемое по формуле (4.10). От-

сюда следует, что пусковой момент зависит от подводимого к двигателю напряжения U_1 во второй степени и от соотношения параметров рабочей цепи асинхронного двигателя (момент тем меньше, чем больше индуктивное сопротивление рассеяния машины X_k). Пусковой момент обычно выражают в относительных единицах, а величину

$$M_{n*} = \frac{M_n}{M_{ном}} = k_n$$

называют кратностью начального пускового момента. Для двигателей с короткозамкнутым ротором $M_{n*} = 1,0 \dots 2,0$.

Если момент M_n больше нагрузочного момента $M_{сг}$, то ротор начнет вращаться и его скорость будет возрастать до тех пор, пока электромагнитный момент M не уравновесит момент $M_{сг}$. При этом скольжение будет уменьшаться. Исследование зависимости $M = f(s)$ показывает, что сначала (при больших значениях s) момент M растет, а затем, достигнув максимального значения, начинает уменьшаться и при $s = 0$ становится равным нулю (см. рис. 4.5). Для определения максимального значения электромагнитного момента M_{max} (или соответствующей ему максимальной электромагнитной мощности) необходимо взять производную от $M = f(s)$ по s и приравнять ее к нулю.

Скольжение, соответствующее максимальному значению момента $M = M_{max}$, называют критическим ($s_{кр}$). Оно определяется выражением

$$s_{кр} = \pm \frac{R_2''}{\sqrt{R_1'^2 + (X_1' + X_2'')^2}}, \quad (4.30)$$

где знак «+» соответствует работе машины в режиме двигателя, а знак «-» — работе машины в режиме генератора. Принимая $c_1 = 1$ и пренебрегая величиной R_1 , так как для большинства асинхронных машин $R_1 = 0,1(X_1 + X_2')$, получаем

$$s_{кр} = \pm \frac{R_2''}{X_1 + X_2'} = \pm \frac{R_2''}{X_k}. \quad (4.31)$$

Значение максимального момента определим, подставляя значение $s_{кр}$ в формулу (4.27),

$$M_{max} = \pm \frac{m_1 U_1^2}{2 \cdot 2\pi n_1 (\pm R_1' + \sqrt{R_1'^2 + (X_1' + X_2'')^2})}, \quad (4.32)$$

или приближенно, считая $c_1 = 1$ и $R_1 = 0$,

$$M_{max} = \pm \frac{m_1 U_1^2}{4\pi n_1 (X_1 + X_2')}.$$

Из выражения (4.32) следует, что максимальный момент асинхронной машины и, в частности, асинхронного двигателя:

- возникает при большем скольжении, т.е. если увеличивается отношение R_2''/X_k ;
- пропорционален квадрату напряжения U_1 , подводимого к двигателю;
- не зависит от активного сопротивления ротора;
- тем меньше, чем больше сопротивления рассеяния первичной и вторичной цепей.

Для асинхронных двигателей максимальный момент обычно выражают в относительных единицах

$$M_{max*} = \pm \frac{M_{max}}{M_n} = k_M,$$

и называют *кратностью максимального момента*, или *перегрузочной способностью* (k_M). Обычно $M_{max*} = (1,7 \dots 3)M_{ном}$.

Из выражения (4.30) следует, что пусковой момент M_n достигает максимального значения, т.е. становится равным M_{max} при условии, что активное сопротивление цепи ротора равно индуктивному сопротивлению рассеяния машины.

Отношение минимально допустимого вращающего момента в процессе пуска $M_{мин}$ к номинальному моменту должно быть не менее 0,6. При пуске под нагрузкой при недостаточном минимальном моменте может произойти «застывание» электродвигателя на малой частоте вращения, т.е. пуск не завершится переходом к частоте вращения, близкой к синхронной. В этом случае режим работы близок к режиму короткого замыкания и является аварийным.

Формула Клосса. При решении ряда вопросов электропривода важно определять зависимость $M = f(s)$ по данным, приведенным в каталогах на электродвигатели. Обычно по каталожным данным можно установить значение момента при номинальной нагрузке $M_{ном}$, скольжение при этой нагрузке $s_{ном}$ и перегрузочную способность k_M , с помощью которой можно установить и максимальный момент при номинальном напряжении: $M_{max} = k_M M_{ном}$.

Найдем отношение M/M_{max} , разделив значение M из выражения (4.27) на M_{max} , выраженное формулой (4.32). В асинхронных машинах при отсутствии добавочного сопротивления в цепи ротора обычно $R_1' = R_2''$. Учитывая это, а также приняв $c_1 = 1$ и выразив R_2'' из формулы (4.31), после соответствующих преобразований получим используемую иногда при расчетах приближенную зависимость (формулу Клосса)

$$\frac{M}{M_{max}} \approx \frac{2}{s_{кр}/s + s/s_{кр}}.$$

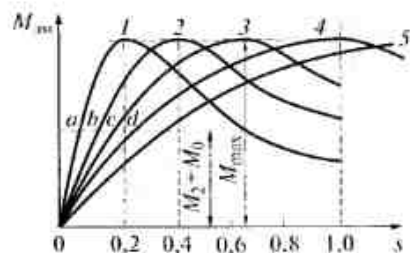


Рис. 4.16. Механические характеристики при $R_n \neq 0$

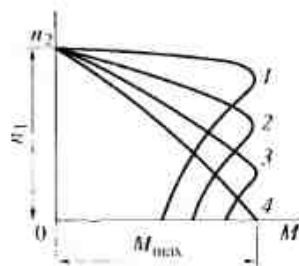


Рис. 4.17. Зависимость значения частоты вращения ротора от значения вращающего момента при $R_n \neq 0$

которая дает приемлемую точность для исследования двигательного режима как в области пуска, так и при нормальных нагрузках.

Механические характеристики асинхронной машины при наличии добавочного сопротивления в цепи ротора ($R_n \neq 0$). При введении в цепь фазного ротора добавочного сопротивления, как было показано выше, увеличивается критическое скольжение ($s_{кр}$), т.е. вращающий момент достигает максимума (M_{max}) при повышении скольжения, а само значение M_{max} остается неизменным. Механические характеристики при $R_n \neq 0$ (кривые 2...5) показаны на рис. 4.16. Кривая 4 соответствует равенству активного сопротивления цепи ротора индуктивному сопротивлению рассеяния машины ($R_2' = X_k$), т.е. моменту пуска ($s_{кр} = 1$) двигателя. Если $R_2' > X_k$, то максимальный момент достигается при $s_{кр} > 1$, т.е. в режиме электромагнитного тормоза (кривая 5). Кроме того, из выражения (4.26) следует, что при введении в цепь ротора активного добавочного сопротивления одновременно уменьшается пусковой ток.

Зависимость частоты вращения ротора n от вращающего момента M , т.е. $n = f(M)$, приведена на рис. 4.17.

4.12. Круговые диаграммы

Круговая диаграмма — это, по сути, векторная диаграмма Г-образной схемы замещения асинхронной машины с некоторыми дополнительными построениями. Она дает наглядное представление о количественных и качественных соотношениях токов, мощностей и напряжений в отдельных элементах асинхронной машины и позволяет определить графически все величины, характеризующие работу асинхронной машины. Круговая диаграмма представляет собой геометрическое место концов векторов первичного тока машины I_1 при $U_1 = \text{const}$ и при изменении скольжения в диапазоне $-\infty \leq s \leq +\infty$. Если активные и индуктивные сопротивле-

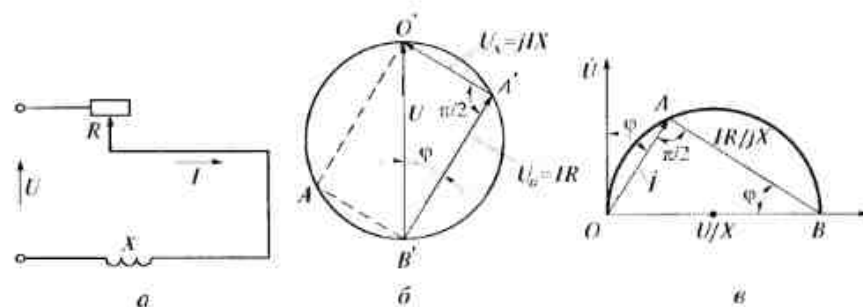


Рис. 4.18. Схема цепи с постоянным индуктивным и переменным активным сопротивлением (а), треугольники напряжений (б) и токов (в)

ния машины считать постоянными, а изменение переменных величин (напряжения, тока, МДС и т.д.) — синусоидальным, то геометрическим местом концов векторов тока будет окружность. Для двигателей с переменными параметрами диаграмма представляет собой сопряжение нескольких окружностей.

Упрощенная круговая диаграмма. Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из постоянного индуктивного (X) и переменного активного (R) сопротивлений (рис. 4.18), к зажимам которой приложено синусоидальное напряжение U . Такая цепь аналогична рабочему контуру упрощенной Г-образной схемы замещения (см. рис. 4.14, в). Построим для этой цепи треугольник напряжений OAB (рис. 4.18, б) с постоянной гипотенузой $OB' = U$, являющейся диаметром окружности (так как прямой угол опирается на диаметр). Чтобы получить зависимость тока от активного переменного сопротивления, разделим стороны треугольника на jX . В этом случае стороны треугольника не только изменятся по

величине, но повернутся на угол $\frac{\pi}{2}$ против положительного направления вращения векторов (треугольник OAB на рис. 4.18, в). При этом вектор тока I отстает от вектора напряжения U на угол φ . Таким образом, при изменении активного сопротивления R от 0 до бесконечности конец вектора тока скользит по окружности (называемой окружностью токов), построенной на диаметре $U/X = \text{const}$. Аналогичную диаграмму (с соответствующими изменениями) можно построить и для рабочего контура. Поскольку рабочий контур имеет постоянное индуктивное сопротивление $X_1 + X_2'$ и активное переменное сопротивление $(R_1 + R_2' + R_2'(1-s)/s)$, то гео-

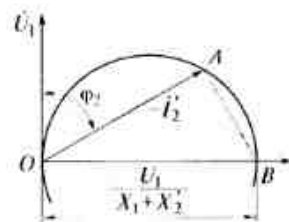


Рис. 4.19. Упрощенная векторная диаграмма асинхронного двигателя

метрическое место концов векторов тока $-I_2'$ при изменении s представляет собой окружность, построенную на диаметре $OB = U_1/X_k$ (рис. 4.19).

Для упрощенной схемы замещения, состоящей из двух контуров (намагничивающего и рабочего), подключенных к сети с $U_1 = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$,

$$I_1 = I_0 + (-I_2'),$$

где $I_0 = \dot{U}_1 / (Z_m + Z_1) = \text{const}$ — ток, определяемый из намагничивающего контура, отстает от \dot{U}_1 на угол φ_0 , причем $\text{tg } \varphi_0 = \frac{X_m + X_1}{R_m + R_1}$.

Поскольку $(X_m + X_1) > (R_m + R_1)$, то угол φ_0 близок к $\frac{\pi}{2}$. Согласно условию напряжение U_1 , частота f_1 и параметры намагничивающего контура постоянны, следовательно, ток $I_0 = \text{const}$ и угол $\varphi_0 = \text{const}$ независимо от режима работы асинхронного двигателя. Ток I_0 можно получить, если асинхронный двигатель привести во вращение с синхронной частотой $n = n_1$, тогда $s = 0$, а $\frac{R_2'}{s} = \infty$, т.е. цепь разомкнута. Векторная диаграмма напряжения и тока намагничивающего контура изображена на рис. 4.20. Совместив диаграммы, показанные на рис. 4.19 и 4.20, получим упрощенную круговую диаграмму (рис. 4.21, а). На круговой диаграмме проводят две линии. Одна из них (линия полезной мощности OK) соединяет точки окружности, соответствующие режимам холостого хода ($s = 0$) и короткого замыкания (ротор заторможен, т.е. $s = 1$), в которых полезная мощность $P_2 = 0$. Вторая линия (линия электромагнитной мощности OT) соединяет точки окружности, в которых электромагнитная мощность $P_{\text{эм}} = 0$. Одной из таких точек является точка O , в которой $n = n_1$ и $s = 0$, так как при одинаковых частотах вращения ротора и магнитного поля мощность со статора на ротор не передается. В принципе, при холостом ходе электромагнитная мощность не равна нулю, поскольку со статора на ротор должна быть передана мощность, необходимая для покрытия механических потерь. Но эти потери, как правило, очень малы, поэтому приближенно можно считать, что в режиме холостого хода $P_{\text{эм}} = 0$. Вторая точка, в которой $P_{\text{эм}} = 0$, соответствует бесконечной скорости ротора. Действительно, из схемы замещения следует, что при $s = \pm\infty$ вторичный кон-



Рис. 4.20. Векторная диаграмма асинхронной машины в режиме холостого хода

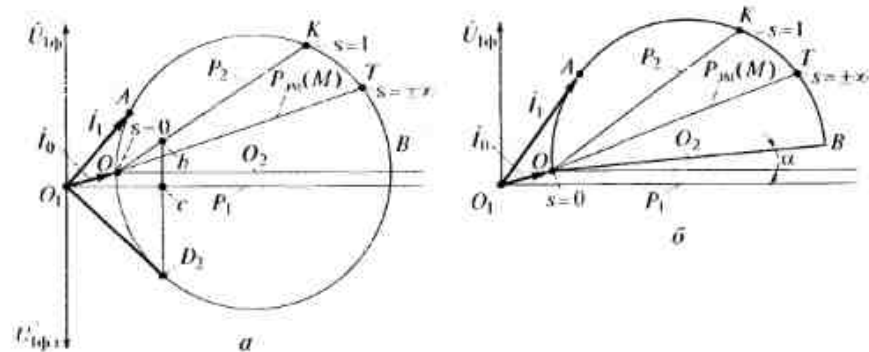


Рис. 4.21. Круговые диаграммы асинхронной машины:

а — упрощенная; б — уточненная

гур состоит только из индуктивного сопротивления X_2' (так как $R_2'/s = 0$). В этом случае

$$\begin{aligned} \cos \psi_2 &= \cos(\dot{E}_2', \dot{I}_2') = \cos \pi/2 = 0 \\ \text{и } P_{\text{эм}} &= E_2' I_2' \cos \psi_2 = 0. \end{aligned}$$

Как следует из выражения (4.20), при $\omega_1 = \text{const}$ (т.е. $f_1 = \text{const}$) $P_{\text{эм}} = M$, поэтому линию электромагнитной мощности часто называют *линией моментов двигателя*.

Далее будет показано, что отсчет подведенной мощности всегда производится от оси абсцисс круговой диаграммы, поэтому ось абсцисс называют *линией подведенной мощности* ($P_1 = 0$).

Следует заметить, что часть окружности токов, заключенная между точками O ($s = 0$) и K ($s = 1$), соответствует двигательному режиму работы асинхронной машины: от точки K ($s = 1$) до точки T ($s = \pm\infty$) — режиму электромагнитного торможения, и от точки O ($s = 0$) до точки T ($s = \pm\infty$) — генераторному режиму.

Уточненная круговая диаграмма. Упрощенная Г-образная схема замещения дает неточные результаты, особенно для двигателей малой мощности. Поэтому чаще всего используют уточненную Г-образную схему замещения (см. рис. 4.14, б), которой соответствует уточненная круговая диаграмма. Как было показано в подразд. 4.9, при вынесении намагничивающего контура на внешние зажимы возникает погрешность в значении тока I_2'' , которая компенсируется изменением параметров рабочего контура так, чтобы токи I_2' в Т-образной схеме замещения и в Г-образной схеме замещения были равны по значению и совпадали по фазе относительно напряжения \dot{U}_1 . В соответствии с этим уточненная круговая диаграмма несколько отличается от упрощенной круговой диаграммы (см. рис. 4.21, б). Во-первых, диаметр окружности токов (геометрического места концов векторов тока) поворачивает-

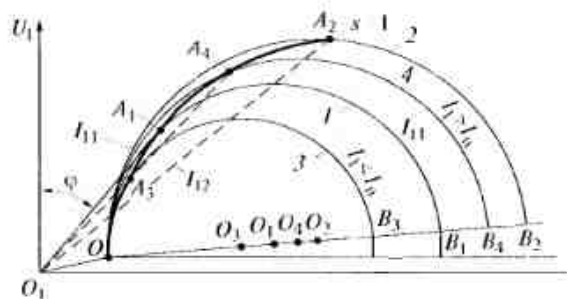


Рис. 4.22. Точная круговая диаграмма:

1 — основная окружность; 2 — пусковая окружность; 3 — дополнительные окружности

ся в направлении вращения векторов на угол $\alpha = \text{arctg} \frac{2I_0 R_1}{U_{10}}$, во-

вторых, ее параметры (активные и индуктивные сопротивления) должны соответствовать параметрам уточненной схемы замещения. Угол α обычно невелик: в двигателях большой и средней мощности $\alpha = \text{arctg} (0,02 \dots 0,05)$; а в двигателях малой мощности $\alpha = \text{arctg} (0,05 \dots 0,08)$.

Точная круговая диаграмма. По уточненной круговой диаграмме с достаточной точностью можно определять параметры асинхронного двигателя лишь в области номинальных нагрузок (т. е. при скольжениях, приблизительно равных 0,02...0,07). Дело в том, что уточненная круговая диаграмма построена в предположении, что активные и индуктивные сопротивления машины считаются постоянными. В действительности активное сопротивление ротора и индуктивные сопротивления статора и ротора изменяются вследствие эффекта вытеснения тока к поверхности пазов ротора и явления насыщения путей потоков рассеяния. Эффект вытеснения тока к поверхности проявляется при скольжениях, близких к единице, когда частота тока в роторе увеличивается. В результате ток в стержнях ротора вытесняется в «верхние» их части (см. подразд. 4.14). В связи с этим активное сопротивление ротора увеличивается, а его индуктивное сопротивление уменьшается. Насыщение стали зубцов статора и ротора (при закрытых и полуоткрытых пазах), происходящее при больших токах (т. е. в области скольжений от $s_{кр}$ до 1), также вызывает уменьшение потоков рассеяния и, следовательно, индуктивных сопротивлений статора и ротора. В этом случае нецелесообразно при построении круговой диаграммы уточнять параметры схемы замещения путем учета комплекса \dot{C}_1 , так как диаметр окружности токов непрерывно изменяется (увеличивается с ростом тока), причем каждому значению тока соответствует одно значение индуктивного сопротивления (следовательно, один диаметр окружности токов). Таким образом,

можно построить бесконечное количество таких окружностей. Обычно ограничиваются построением двух окружностей токов: первая окружность (пусковая) служит для определения пусковых характеристик ($s = 1$) и кратности максимального момента k_M , вторая (основная) — для определения параметров режима, соответствующего номинальному режиму ($s = s_{ном}$).

Геометрическое место концов векторов тока точной круговой диаграммы представляет собой сопряжение этих окружностей через точки, характерные для каждой из окружностей ($\dot{I}_1 = \dot{I}_{1н}$ и $\dot{I}_1 = \dot{I}_{1п}$). В более сложных случаях следует построить несколько кругов, например четыре (рис. 4.22), для четырех значений тока \dot{I}_{11} , \dot{I}_{12} , \dot{I}_{13} и \dot{I}_{14} , причем токам \dot{I}_{11} и \dot{I}_{12} соответствуют основная и пусковая окружности 1 и 2, а токам \dot{I}_{13} и \dot{I}_{14} — дополнительные окружности 3 и 4. Нанеся на эти круги соответствующие им токи, получим точки A_1 , A_2 , A_3 и A_4 . Соединив их плавной кривой, построим геометрическое место концов векторов тока двигателя (см. рис. 4.22) с сопротивлением $X_c = f(I_1)$. Положение линий механической и электромагнитной мощности также будет изменяться.

Определение характеристик асинхронного двигателя с помощью круговой диаграммы. В соответствии с построением круговая диаграмма (рис. 4.23) позволяет вычислять токи для любого режима работы асинхронной машины. Ток I_1 определяется отрезком $O_1 A$ (где A — точка окружности токов, соответствующая некоторому режиму работы, т. е. некоторой полезной мощности P_2) в масштабе тока m_r . Ток I_1' равен отрезку $O A$ (также в масштабе тока). Подведенная к двигателю активная мощность

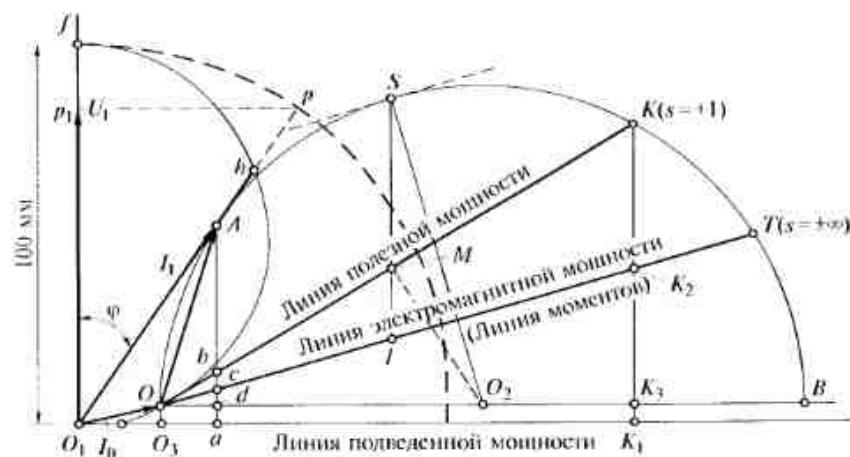


Рис. 4.23. Определение параметров асинхронного двигателя по круговой диаграмме

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi,$$

т. е. при постоянном напряжении U_1 активная мощность пропорциональна активной составляющей первичного тока ($I_{1a} = I_1 \cos \varphi$). Однако ток I_{1a} определяется отрезком Aa , перпендикулярным оси абсцисс (см. рис. 4.23). Таким образом, P_1 также определяется отрезком Aa , выраженным в масштабе мощности m_p . При изменении нагрузки точка A перемещается по окружности, а точка a — по оси абсцисс. Полезная мощность P_2 определяется отрезком Ab , т. е. частью перпендикуляра Aa , заключенной между соответствующей точкой окружности токов (в данном случае — точка A) и линией полезной мощности (точка b) в масштабе мощности m_p . Аналогичным образом можно определить электромагнитную мощность P_m . Она также является частью отрезка Aa , но заключенного между точкой A окружности и точкой c , принадлежащей линии электромагнитной мощности. Этим же отрезком Ac , но в масштабе момента m_M , выражается электромагнитный момент двигателя (см. рис. 4.23). Отрезок ad (в масштабе мощности) будет определять мощность холостого хода ($P_0 = 3I_{0\phi}^2 R_1 + P_c + P_{\text{мх}} + P_{\text{воб}}$). Вычитая из мощности P_1 мощность P_2 и мощность холостого хода P_0 , получим сумму потерь в обмотках статора и ротора:

$$P_{\text{м1}} + P_{\text{в2}} = P_1 - P_2 - P_0 = Aa - Ae - ad = bd.$$

Ранее было показано, что $P_m = P_1 - P_{\text{м1}} - P_c$. Подставляя в это выражение соответствующие отрезки, получаем, что $P_{\text{м1}} = cd$, а $P_{\text{в2}} = cb$. Поскольку для номинального режима эти отрезки на круговой диаграмме весьма малы, то на практике эти потери определяют аналитически.

Сделав дополнительные построения, по круговой диаграмме можно определять скольжение, КПД и $\cos \varphi$. Однако практическое значение имеет только определение $\cos \varphi$. Для этого на оси ординат откладывают отрезок O_1f , равный 100 мм, и строят на нем как на диаметре полуокружность (см. рис. 4.23). Продолжая вектор тока (для заданного значения отдаваемой мощности — O_1A) до пересечения с этой полуокружностью в точке h и измеряя O_1h в миллиметрах, получаем $\cos \varphi = O_1h/O_1f = O_1h/100$. Значение $\cos \varphi$ можно найти и по-другому. Проведем из точки O_1 как из центра вспомогательную окружность радиусом 100 мм. Найдем точку (p) пересечения вектора тока (O_1A) или его продолжения со вспомогательной окружностью. Проекция отрезка O_1p на ось ординат (O_1p_1) определит величину коэффициента мощности ($\cos \varphi = O_1p_1/O_1p = O_1p_1/100$).

По уточненной круговой диаграмме необходимые величины находят так же, как описано выше, но отрезки соответствующих мощностей располагаются на перпендикуляре, опущенном из точки A на диаметр OB (см. рис. 4.23).

4.13. Рабочие характеристики

При эксплуатации нагрузка асинхронного двигателя может изменяться от холостого хода до номинальной, а кратковременно — и выше номинальной. Поэтому необходимо, чтобы двигатель имел достаточно высокие КПД и коэффициент мощности не только при номинальной, но и при неполной нагрузке, составляющей более 0,7 номинальной. С увеличением КПД уменьшается потребляемая двигателем активная мощность $P_1 = P_2/\eta$, а с увеличением коэффициента мощности $\cos \varphi$ уменьшается потребляемая им полная мощность $S_1 = P_1/\cos \varphi$ за счет снижения реактивной мощности $Q_1 = S_1 \sin \varphi$. То и другое приводит к уменьшению тока, потребляемого из сети,

$$I_1 = \frac{P_2}{m_1 U_1 \eta \cos \varphi},$$

полной мощности установленных на электрических станциях синхронных генераторов, потерь в трансформаторах и электрических сетях при передаче энергии, уменьшая тем самым и стоимость эксплуатации двигателя. При проектировании двигателя можно добиться увеличения значения КПД и коэффициента мощности путем применения более совершенных магнитных материалов (с лучшими магнитными свойствами), уменьшения зазора между статором и ротором (до минимально допустимого), а также снижения электромагнитных нагрузок (линейной токовой нагрузки и магнитной индукции в воздушном зазоре) за счет увеличения размеров машины (что, естественно, увеличивает стоимость изготовления двигателя). При этом стремятся, чтобы сумма затрат на изготовление двигателя и его эксплуатацию была минимальной. Двигатель проектируется таким образом, чтобы максимальное зна-

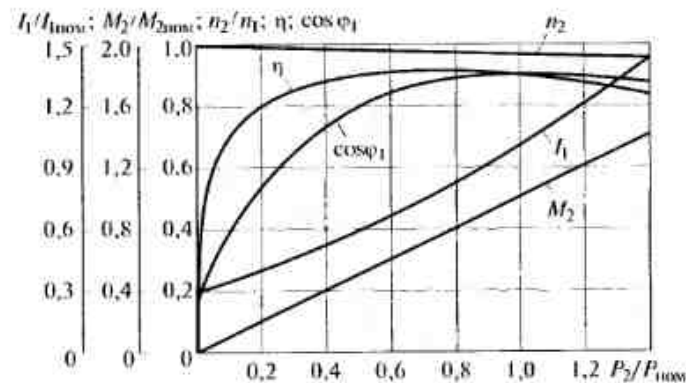


Рис. 4.24. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

чение КПД имело место при некоторой нагрузке ($P_2/P_{2н} = 0,7$). Тогда в диапазоне нагрузок $P_2/P_{2н}$ от 0,5 до 1 КПД остается практически постоянным и составляет для двигателей общепромышленного применения 0,65...0,95.

Зависимости скольжения s , момента на валу M_2 , тока статора I_1 , КПД η и $\cos \varphi$ от полезной мощности P_2 (при $U_1 = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$), выявляющие, как изменяются технические показатели двигателя в функции нагрузки, называют *рабочими характеристиками*. Их можно определить экспериментально или путем расчета по схеме замещения либо по круговой диаграмме. Примерный вид рабочих характеристик асинхронного двигателя показан на рис. 4.24. Скольжение, ток статора, момент на валу, потребляемая и полезная мощности приведены на графике в относительных единицах.

Зависимость $s = f(P_2)$. Из выражения (4.1) следует, что $n = n_1(1 - s)$, а из выражения (4.21) — что при холостом ходе $s = 0$, а $n = n_1$, так как в этом режиме потери в обмотке ротора $P_{\text{р2}}$ несравнимо меньше электромагнитной мощности $P_{\text{эм}}$. При переходе от режима холостого хода к режиму полной нагрузки скольжение s (и частота вращения n) изменяется незначительно, поскольку при проектировании двигателей стремятся к уменьшению потерь мощности в роторе $P_{\text{р2}}$, а это означает, что скольжение при номинальном режиме не должно превышать 0,02...0,07.

Зависимость $M_2 = f(P_2)$. Эта зависимость определяется соотношением $P_2 = M_2\omega$. Поскольку при изменении нагрузки в пределах от холостого хода до номинальной частота вращения асинхронных двигателей изменяется мало, то зависимость $M_2 = f(P_2)$ асинхронного двигателя близка к линейной.

Зависимость $\eta = f(P_2)$. Эта зависимость имеет такой же характер, как и для трансформатора. При изменении нагрузки электрической машины отдельные виды потерь изменяются по-разному: электрические потери в обмотках статора и ротора, а также добавочные потери изменяются пропорционально квадрату тока на-

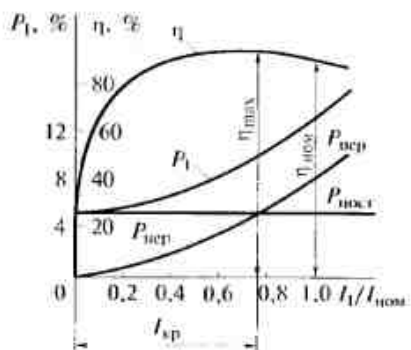


Рис. 4.25. Определение максимального значения КПД

грузки; электрические потери в щеточном контакте изменяются пропорционально току в первой степени; механические и магнитные потери остаются практически постоянными — такими же, как и при холостом ходе, если напряжение машины U_1 и частота ее вращения n не изменяются. По этому признаку все виды потерь можно разделить на две группы: постоянные потери $P_{\text{пост}} = P_c + P_{\text{мх}}$ и переменные $P_{\text{пер}} = P_{\text{эл2}} + P_r$. Мощность P_2 , отдаваемая машиной, пропорциональна току нагрузки I в первой степени, а мощность P_1 , потребляемая машиной (и включающая в себя, помимо P_2 , сумму всех потерь $\sum P = P_{\text{пост}} + P_{\text{пер}}$), имеет зависимость от тока в виде $P_1 = f(aI^2 + bI + c)$, где a, b, c — постоянные. В этом случае можно показать, что при изменении нагрузки электрической машины ее КПД изменяется, как показано на рис. 4.25. При холостом ходе $\eta = 0$, так как полезная мощность P_2 отсутствует. При повышении нагрузки КПД возрастает за счет увеличения P_2 , но с некоторого момента переменные потери $P_{\text{пер}}$ возрастают быстрее, чем P_2 , поэтому увеличение КПД прекращается, и он начинает уменьшаться. КПД достигает максимума при такой нагрузке, при которой $P_{\text{пер}} = P_{\text{пост}}$. При увеличении номинальной мощности относительная величина суммарных потерь уменьшается. Следовательно, будет возрастать и КПД машины. Эта закономерность проявляется во всех типах вращающихся электрических машин и в трансформаторах — чем больше номинальная мощность машины, тем выше ее КПД (для машин мощностью свыше 100 кВт он составляет 0,92...0,96), и, наоборот, КПД машин малой мощности и микромашин обычно невелик (примерно 0,4...0,6).

Зависимость $\cos \varphi = f(P_2)$. Коэффициент мощности ($\cos \varphi$) представляет собой отношение активной мощности (P) к полной мощности (S). В режиме холостого хода $\cos \varphi \neq 0$, так как существует небольшая активная составляющая тока. При переходе от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки коэффициент мощности возрастает от значения $\cos \varphi = 0,09...0,18$ до некоторой максимальной величины: для двигателей малой и средней мощности (1...100 кВт) $\cos \varphi = 0,7...0,9$, а для двигателей большой мощности (свыше 100 кВт) $\cos \varphi = 0,90...0,95$. При дальнейшем увеличении нагрузки $\cos \varphi$ несколько уменьшается.

Зависимость $I_1 = f(P_2)$. Активная составляющая тока пропорциональна полезной мощности. Реактивная составляющая в диапазоне рабочих нагрузок изменяется мало, так как она определяется главным образом током холостого хода, который составляет 20...40% номинального тока.

В двигателях с фазным ротором кривые η и $\cos \varphi$ располагаются несколько ниже, чем у соответствующих двигателей с короткозамкнутым ротором. На это влияют следующие причины:

- возникновение дополнительных потерь мощности в результате наличия щеток на контактных кольцах;

- уменьшение полезной мощности в связи с худшим использованием объема пазов ротора (обмотку ротора выполняют из изолированного провода, вследствие чего пазы ротора частично заполнены изоляцией);

- увеличение намагничивающего тока вследствие возрастания магнитного сопротивления зубцового слоя ротора в результате уменьшения поперечного сечения зубцов.

4.14. Пуск в ход асинхронных двигателей. Короткозамкнутые двигатели с улучшенными пусковыми свойствами

Любой электродвигатель, и в том числе асинхронный, оценивается по совокупности пусковых рабочих и регулировочных характеристик. Основными показателями при пуске являются начальный пусковой момент и начальный пусковой ток. Чтобы ротор двигателя при пуске мог прийти во вращение, развиваемый двигателем пусковой момент должен быть больше момента сопротивления на валу, создаваемого приводимым во вращение механизмом. В ряде случаев (при пуске шаровых мельниц, дробилок, компрессоров и т.д.) требуется значительный пусковой момент, превышающий номинальный. При пуске возникает значительный ток (что видно, например, на круговых диаграммах), однако значение пускового тока для данной сети не должно превышать определенных пределов, зависящих от мощности сети. Для двигателей большой мощности и слабой сети необходимо уменьшать значение пускового тока, что отразится на значении пускового момента. При известном соотношении мощностей двигателя и сети допустимо прямое включение двигателя в сеть. Для улучшения пусковых свойств короткозамкнутых асинхронных двигателей с высотами осей вращения $h = 280 \dots 355$ мм применяют бутылочную форму паза. В приводах с тяжелыми условиями пуска используют также специальные типы короткозамкнутых двигателей — глубокопазные и двухклеточные. Однако в приводах большой мощности, особенно с регулированием частоты вращения, предпочтение отдается двигателям с фазным ротором, в которых благоприятные условия пуска (большой пусковой момент при малом пусковом токе) легко достигаются при помощи пускового реостата в цепи ротора. Следует заметить, что большое значение имеют продолжительность пуска, потери энергии в обмотках и их нагрев, переходные процессы при пуске.

Таким образом, способы пуска зависят от конструктивного исполнения асинхронных двигателей. Для двигателей с фазным ротором пуск осуществляется с помощью реостата, вводимого в цепь

ротора. Включение в сеть короткозамкнутых двигателей производится либо при $U_n = U_{ном}$ (прямое включение), либо при пониженном напряжении ($U_n < U_{ном}$).

Пуск в ход двигателей с фазным ротором. Пусковой ток двигателя с фазным ротором можно уменьшать путем включения в цепь ротора добавочного сопротивления. Включение индуктивного сопротивления привело бы одновременно с уменьшением вторичного тока I_2 также к увеличению угла сдвига ψ_2 этого тока от ЭДС E_2 , что вызывает значительное уменьшение вращающего момента. При включении в цепь ротора активного сопротивления угол ψ_2 уменьшается и поэтому вращающий момент, несмотря на уменьшение тока I_2 , при соответствующих условиях (см. подразд. 4.11) даже увеличивается. В связи с этим практическое значение имеет включение в цепь ротора только активного сопротивления (рис. 4.26, а).

Из выражений (4.31) и (4.32) следует, что R_2 не изменяет значение максимального момента, а влияет лишь на значение скольжения $s_{кр}$, при котором момент достигает максимума. Отсюда следует, что если ввести во вторичную цепь такое добавочное сопротивление R_d , при котором $s_{кр} = 1$, то пусковой момент достигнет своего максимально возможного значения. Кратность пускового момента будет при этом равна перегрузочной способности k_m .

Плавность пуска обеспечивается наличием в реостате нескольких ступеней сопротивления. Для уменьшения времени пуска вы-

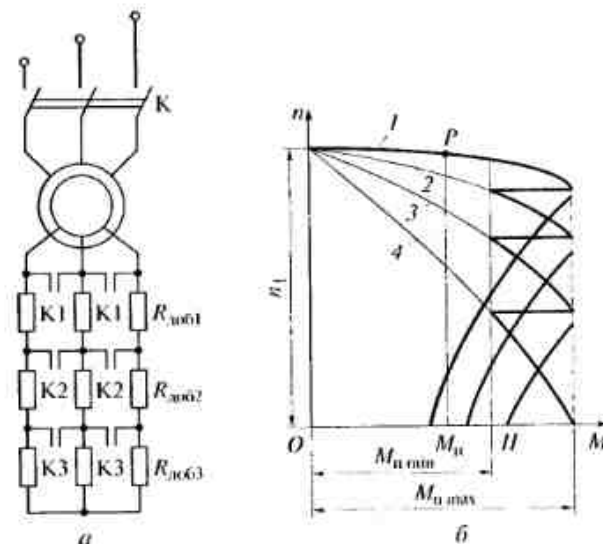


Рис. 4.26. Реостатный пуск асинхронного двигателя:
а — схема пуска; б — механические характеристики (1—4) при последовательном отключении отдельных ступеней пускового реостата

ключение отдельных ступеней сопротивления производят при частоте вращения, соответствующей наибольшему вращающему моменту M_n двигателя для остающегося сопротивления цепи ротора, как это показано на рис. 4.26, б. После выключения последней ступени пускового реостата обмотку ротора замыкают накоротко.

Прямой пуск. Короткозамкнутые асинхронные двигатели проектируют так, чтобы при непосредственном подключении обмотки статора к сети пусковые токи не создавали опасных с механической точки зрения электродинамических усилий. Кроме того, превышение температуры, возникающее при пуске, не должно нарушать термическую прочность изоляции обмотки статора. Двигатели этого типа обычно пускают с помощью магнитного пускателя и разгоняют автоматически по естественной механической характеристике от $M = M_n$ до $M = M_{cr}$. Если в момент пуска $M_n < M_{cr}$, двигатель разогнаться не сможет. Недостатками данного способа пуска являются сравнительно небольшой пусковой момент (кратность пускового момента $k_m = M_n/M_n = 1 \dots 2$) и большой бросок пускового тока (кратность пускового тока $k_m = I_n/I_n = 5 \dots 7$).

Пуск при пониженном напряжении. Такой пуск применяют для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором большой мощности, а также для двигателей средней мощности при недостаточно мощных электрических сетях. Понижение напряжения может осуществляться следующими путями:

- переключение схемы соединения обмотки статора (рис. 4.27, а) с помощью переключателя со схемы звезда (Υ) на схему треугольник (Δ). При этом напряжение, подаваемое на фазы обмотки статора, соединенные в схему звезда, уменьшается в 1/3 раза, что обуславливает уменьшение фазных токов в 1/3 раза и линейных токов в 3 раза. По окончании процесса пуска и разгона двигателя

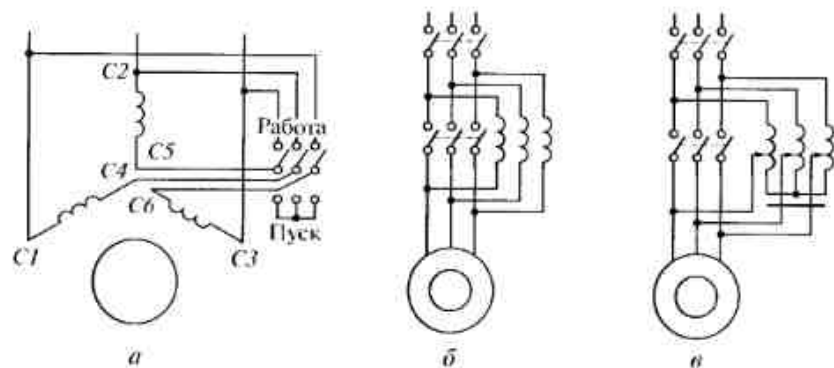


Рис. 4.27. Понижение напряжения при пуске:

а — переключением схемы соединения обмотки; б — индуктивным сопротивлением; в — автотрансформатором

до номинальной частоты вращения обмотку статора переключают на рабочую схему Δ . Этот способ не позволяет осуществлять плавный пуск, также его недостатком является значительное уменьшение пускового и максимального моментов двигателя, которые пропорциональны квадрату приложенного напряжения, поэтому его можно использовать только при пуске двигателей без нагрузки;

- включение в цепь обмотки статора на период пуска дополнительных реактивных (реакторов) сопротивлений (рис. 4.27, б). При этом на указанных сопротивлениях создаются некоторые падения напряжения ΔU , пропорциональные пусковому току, вследствие чего на обмотку статора подается пониженное напряжение. По мере разгона двигателя снижается ЭДС E_{Σ} , индуцированная в обмотке ротора и пусковой ток. В результате уменьшается падение напряжения ΔU на указанных сопротивлениях и автоматически возрастает приложенное к двигателю напряжение. После окончания разгона реакторы замыкаются накоротко. Плавный пуск может быть осуществлен включением в цепь регулируемых реактивных сопротивлений. Значение индуктивного сопротивления подбирается так, чтобы кратность пускового тока $k_m = I_n/I_n = 2 \dots 2,5$. Для этого напряжение необходимо понизить в 2—3 раза, но тогда начальное значение пускового момента уменьшится в $(U_n/U_n)^2$, т. е. в 4—9 раз;

- подключение двигателя к сети через понижающий автотрансформатор (рис. 4.27, в), который может иметь несколько ступеней, переключаемых в процессе пуска соответствующей аппаратурой. Этот способ позволяет получить при одинаковых с предыдущим случаем токах в линии примерно вдвое большую величину пускового момента: если сохранить прежнее значение кратности пускового тока ($k_m = 2 \dots 2,5$), то требуется понижение напряжения автотрансформатором только в 1,5...2 раза. Недостатком такого пуска является значительная стоимость пускового оборудования.

Асинхронные двигатели с улучшенными пусковыми свойствами. В двигатели с короткозамкнутой обмоткой ротора невозможно во время пуска ввести дополнительное сопротивление, как это делается в двигателях с фазным ротором. Пусковые характеристики двигателя с короткозамкнутой обмоткой можно улучшить, если использовать для увеличения активного сопротивления обмотки ротора эффект вытеснения тока к поверхности в стержнях обмотки ротора (поверхностный эффект), проявляющийся в начале пуска, когда частота тока в роторе f_2 равна частоте сети f_1 . Суть поверхностного эффекта состоит в том, что индуктивные сопротивления элементов проводника, занимающих различное положение по высоте паза, при частотах порядка 50 Гц получаются неодинаковыми. Как следует из сравнения количества сцепленных с этими элементами силовых линий потока рассеяния (рис. 4.28, а),

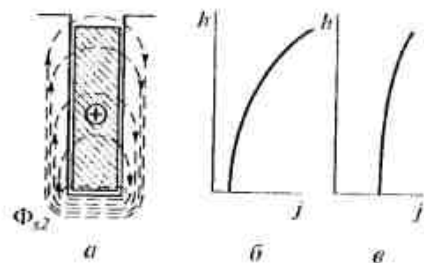


Рис. 4.28. Эффект вытеснения тока к поверхности:

a — силовые линии потока пазового рассеяния; *b* — распределение плотности тока по высоте паза при пуске; *в* — распределение плотности тока по высоте паза при работе двигателя

индуктивное сопротивление (или потокосцепление) элемента проводника, расположенного ближе к зазору (в верхней части паза), меньше индуктивного сопротивления элемента, расположенного ближе ко дну паза (в нижней части паза). Причем неравномерность в распределении проявляется лишь по высоте сечения, по ширине проводника ток распределяется практически равномерно. Соответственно большая плотность тока будет в элементах проводника, расположенных ближе к зазору (см. кривую распределения плотности тока на рис. 4.28, *b*). Плотность тока в этой части сечения может существенно превышать среднюю плотность тока в проводнике. По углубленной в паз части сечения проводника протекает малая часть тока, а это значит, что полезное сечение проводника уменьшается, а его активное сопротивление возрастает. При скольжениях, близких к номинальному, частота f_2 существенно меньше частоты сети f_1 ($s = 0,02 \dots 0,07$, $f_2 = 1 \dots 3,5$ Гц) и индуктивное сопротивление X_l ($X_l = 2\pi f_2 L$) становится значительно меньше, чем активное, и ток равномерно распределяется по высоте стержня (см. рис. 4.28, *в*).

Это явление используется в двухклеточных асинхронных двигателях и двигателях с глубокими и бутылочными пазами на роторе (глубокопазных двигателях).

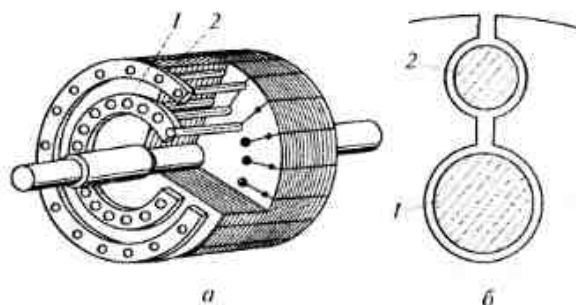


Рис. 4.29. Общий вид (*a*) и разрез паза (*b*) ротора асинхронного двигателя с двойной «беличьей клеткой»:

1 — пусковая клетка; 2 — рабочая клетка

Статор двухклеточного двигателя не отличается от статора обычных двигателей, а ротор его имеет двойную «беличью клетку» (рис. 4.29, *a*). Стержни верхней клетки, расположенной ближе к воздушному зазору (рис. 4.29, *b*), имеют малое сечение, а нижняя клетка выполняется большого сечения. Обе обмотки отделены друг от друга узкими щелями пазов. Таким образом, нижняя (рабочая) клетка имеет большую магнитную проводимость для потоков рассеяния, верхняя (пусковая) — относительно малую. При этом индуктивное сопротивление рассеяния нижней клетки значительно больше, чем верхней. Верхняя и нижняя клетки могут иметь или общее короткозамыкающее кольцо, или каждая из обмоток имеет свое собственное короткозамыкающее кольцо. В первом случае по кольцу проходит ток, равный геометрической сумме токов обеих обмоток, вследствие чего поток рассеяния кольца является потоком их взаимной индукции, во втором случае каждая из обмоток имеет свой собственный поток рассеяния кольца и некоторый поток, охватывающий оба кольца совместно. На практике обычно применяется конструкция с отдельными кольцами, так как при этом стержни отдельных клеток, нагревающиеся при пуске в различной степени, имеют возможность свободно и независимо удлиняться. При этом большое активное сопротивление верхней клетки достигается только уменьшением ее сечения.

При пуске в ход двухклеточного двигателя ток распределяется между верхней и нижней обмотками обратно пропорционально их полным сопротивлениям. Поскольку вследствие поверхностного эффекта нижняя обмотка имеет весьма большое индуктивное сопротивление, то и ее полное сопротивление получается в несколько раз больше полного сопротивления верхней клетки, собственное индуктивное сопротивление которой чрезвычайно мало. Ток нижней клетки получается заметно меньше тока верхней клетки. Кроме того, вследствие большого индуктивного сопротивления рассеяния нижней клетки, ток в ней отстает на большой угол от ЭДС, индуктированной потоком взаимной индукции, и соответственно эта обмотка создает при пуске относительно малый вращающий момент. Наоборот, ток в верхней клетке при пуске не только значителен по величине, но почти совпадает по фазе с ЭДС взаимной индукции (из-за того, что активное сопротивление этой клетки большое, а индуктивное — мало), вследствие чего эта обмотка создает весьма большой вращающий момент. При увеличении частоты вращения двигателя индуктивное сопротивление нижней клетки уменьшится, а ток в ней увеличится при соответствующем уменьшении угла сдвига тока от напряжения. Следовательно, эта клетка начинает постепенно создавать все больший вращающий момент. Когда двигатель наберет номинальную частоту вращения, индуктивное сопротивление нижней клетки по сравнению с ее активным сопротивлением станет ничтожным. Сум-

марный рабочий ток вторичной системы двигателя распределится между обеими обмотками обратно пропорционально их активным сопротивлениям. Поскольку верхняя обмотка имеет в 5—6 раз большее активное сопротивление по сравнению с нижней обмоткой, то ток в верхней клетке станет значительно меньше тока нижней клетки, вследствие чего вращающий момент в основном будет создаваться нижней клеткой. А поскольку нижняя клетка имеет малое активное сопротивление (из-за большого сечения), двигатель работает с высоким КПД. На рис. 4.30 представлена механическая характеристика двухклеточного асинхронного двигателя. Результирующая характеристика (кривая 3) получена путем суммирования ординат кривых 1 и 2. Кратность начального пускового момента такого двигателя $k_M = M_n/M_{ном} = 1,3 \dots 1,7$, а кратность начального пускового тока $k_I = I_n/I_{ном} = 4 \dots 6$.

В короткозамкнутых асинхронных двигателях с высотами осей вращения $h = 280 \dots 355$ мм пазы имеют бутылочную форму (рис. 4.31). По существу, бутылочный паз аналогичен двойной клетке, но более технологичен (изготовление штампа для бутылочного паза ротора значительно дешевле, чем для двойной клетки).

В глубокопазном двигателе «беличья клетка» выполняется путем заливки алюминием А5 глубоких пазов ротора, высота которых в 6—12 раз больше ширины. Для получения специальных характеристик (например, у двигателей с повышенным скольжением) пазы ротора могут заливаться алюминиевым сплавом АКМ 12-4. Проводники, расположенные в глубоких пазах, можно условно разделить на большое число слоев. Нижние слои проводников имеют большую индуктивность, чем верхние. Вследствие проявления поверхностного эффекта в начальный момент пуска проис-

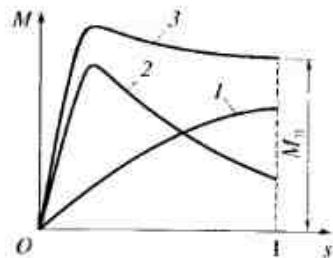


Рис. 4.30. Механическая характеристика асинхронного двигателя с двойной «беличьей клеткой»:

1 — для пусковой клетки; 2 — для рабочей клетки; 3 — результирующая

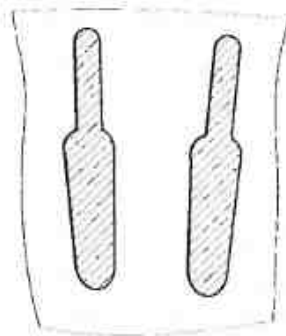


Рис. 4.31. Бутылочная форма паза ротора

ходит вытеснение тока в верхние слои, что равносильно увеличению активного сопротивления стержня. Следовательно, пусковой момент двигателя повышается. При номинальном режиме вытеснения тока не происходит, его распределение приблизительно равномерно по высоте стержня. В результате резко уменьшается активное сопротивление ротора и потери мощности $P_{\text{в2}}$, одновременно увеличивается поток рассеяния и, следовательно, индуктивное сопротивление ротора. Изменение сопротивлений глубокопазного двигателя в зависимости от скольжения приводит к тому, что механическая характеристика близка к характеристике двигателя с двойной «беличьей клеткой».

Применение пазов бутылочной формы в глубокопазном двигателе позволяет сократить высоту пазов ротора, а следовательно, уменьшить диаметр ротора по сравнению с глубокопазным ротором.

Индуктивное сопротивление рассеяния ротора глубокопазного двигателя по сравнению с индуктивным сопротивлением рассеяния ротора двигателя нормального исполнения увеличено, поэтому он имеет несколько уменьшенный $\cos \varphi_n$ и меньшую перегрузочную способность k_M .

Отключение асинхронного двигателя от сети. В работающем асинхронном двигателе имеется некоторый запас электромагнитной энергии, определяемый в основном величиной воздушного зазора. Чем больше воздушный зазор, тем больше и запас электромагнитной энергии. Поэтому в асинхронных машинах этот запас больше, чем в трансформаторах, а в синхронных машинах больше, чем в асинхронных. При отключении машины от сети энергия ее магнитного поля должна рассеяться в той или иной форме. Если фазный ротор асинхронного двигателя разомкнут, то быстрое исчезновение магнитного потока вызывает значительные перенапряжения в обмотках статора, в 3—4 раза превышающие номинальные напряжения, что приводит к возникновению дуги выключения. Те же явления, хотя и в слабой форме, происходят в том случае, если ротор асинхронного двигателя замкнут через большое активное сопротивление, так как последнее способствует быстрому затуханию потока.

Таким образом, отключать асинхронную машину с фазным ротором лучше всего при замкнутом накоротко роторе, поскольку в этом случае при исчезновении потока происходит постепенное рассеяние энергии в его вторичной обмотке.

4.15. Устойчивость работы асинхронного двигателя

В результате правильно выполненного пуска двигателя должен установиться или номинальный режим, или режим недогрузки в точке, расположенной на участке механической характеристики

между точкой холостого хода ($M = 0, n = n_0$) и точкой номинального режима ($M = M_{ном}, n = n_{ном}$). Кратковременно допустимы также режимы нагрузки в точке, расположенной между точками ($M_{ном}, n_{ном}$) и ($M_{max}, n_{кр}$) при моментах, превышающих номинальный момент ($M > M_{ном}$), но меньших, чем максимальный момент ($M < M_{max}$). Длительность этих режимов определяется электрическими потерями в обмотках и их нагревом. При работе двигателя происходят закономерные и случайные нарушения равновесия вращающего момента двигателя (M) и нагрузочного момента механизма (M_{ct}), вследствие чего частота вращения ротора изменяется. Способность двигателя восстанавливать установившуюся частоту вращения при кратковременных возмущениях (изменения нагрузки, напряжения питающей сети и пр.) характеризует устойчивость его работы. Устойчивость зависит от конкретных условий, при которых работает электродвигатель, в частности от формы его механических характеристик и приводимого им во вращение исполнительного механизма. На рис. 4.32, а приведено несколько типичных механических характеристик различных исполнительных механизмов. Для грузополемных механизмов (лифтов, кранов, лебедок и т.п.) характерным является неизменность статического момента M_{ct} независимо от частоты вращения (прямая 1). Вентиляторы, центробежные насосы и подобные механизмы имеют характеристику (часто называемую вентиляторной), при которой нагрузочный момент M_{ct} резко увеличивается с ростом частоты вращения (кривая 2). Бетономешалки, шаровые мельницы и некоторые другие механизмы имеют большое трение в состоянии покоя и при малых частотах вращения, поэтому в таких механизмах с ростом частоты вращения нагрузочный момент падает (кривая 3). Длительная работа в точках пересечения характеристик $M = M_{ct}$ и $M_{ct} = f(n)$ (рис. 4.32, б) возможна только в том случае, если при случайном отклонении частоты вращения от установив-

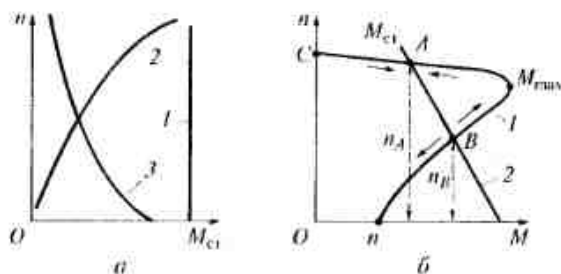


Рис. 4.32. Механические характеристики некоторых исполнительных механизмов (а) и определение статической устойчивости асинхронного двигателя (б)

шейся на ротор действует момент ($M + M_{ct}$), восстанавливающий прежнюю частоту вращения.

Условие равновесия моментов, приложенных к ротору двигателя, известно из механики:

$$M = M_{ct} + \frac{Jd\omega}{dt},$$

где M — электромагнитный момент двигателя; M_{ct} — статический момент нагрузки (момент сопротивления механизма, приводимого во вращение, с учетом механических потерь в двигателе); $\frac{Jd\omega}{dt}$ — динамический момент, зависящий от момента инерции вращающихся масс J и ускорения ротора $\frac{d\omega}{dt}$.

При $M = M_{ct}$ ускорение ротора

$$\frac{d\omega}{dt} = M - \frac{M_{ct}}{J} = 0,$$

т.е. ротор вращается с установившейся частотой. Если $M > M_{ct}$, то ускорение ротора $\frac{d\omega}{dt} > 0$ (ротор ускоряется), а при $M < M_{ct}$ ускорение $\frac{d\omega}{dt} < 0$ — ротор замедляется.

Предположим, что асинхронный двигатель, имеющий механическую характеристику 1, изображенную на рис. 4.32, б, приводит во вращение механизм, у которого статический (нагрузочный) момент M_{ct} падает с увеличением частоты вращения (механическая характеристика 2). В этом случае условие $M = M_{ct}$ выполняется в точках А и В при значениях частоты вращения n_A и n_B . Анализ характеристик 1 и 2 показывает, что в точке В двигатель не может работать устойчиво. Действительно, малейшему увеличению нагрузочного момента M_{ct} соответствует уменьшение частоты вращения двигателя, т.е. появляется динамический замедляющий момент $-(M - M_{ct})$, увеличивающий отклонение частоты вращения от установившегося режима. Причем при работе машины в режиме, соответствующем точке В, т.е. на участке M_{max} характеристики 1, это приводит к уменьшению электромагнитного момента M , т.е. к еще большему возрастанию разности $(M - M_{ct})$. В результате ротор продолжает замедляться до полной остановки. При любом случайном уменьшении статического момента ротор начнет ускоряться, что приводит к дальнейшему увеличению момента M и еще большему ускорению до тех пор, пока машина не перейдет в режим работы, соответствующий точке А. При работе машины в режиме, соответствующем точке А, двигатель работает

устойчиво, так как при случайном увеличении момента M_{ct} и замедлении ротора (т.е. уменьшении частоты вращения n) электромагнитный момент M преобладает над нагрузочным моментом (M_{ct}). Избыточный динамический момент $+(M - M_{ct})$ придает ускорение ротору, и двигатель снова будет работать с установившейся частотой вращения. Таким образом, асинхронный двигатель при работе на участке CM_{max} механической характеристики обладает свойством автоматического регулирования по закону $M = M_{ct}$ за счет изменения частоты вращения ротора (см. рис. 4.32, б).

Из анализа условий работы двигателя в точках *A* и *B* следует, что работа двигателя устойчива, если с увеличением частоты вращения n_2 статический момент M_{ct} уменьшается медленнее, чем электромагнитный момент двигателя M . Это условие, называемое критерием устойчивости, можно записать в следующем виде:

$$\frac{dM}{dn} < \frac{dM_{ct}}{dn}$$

Критерий устойчивости выполняется практически для всех механизмов с падающими характеристиками $M_{ct} = f(n)$ и с характеристиками, не зависящими от частоты вращения (кривые 1 и 3 на рис. 4.32, а), если двигатель работает на участке CM_1 характеристики 1 (см. рис. 4.32, б). Следовательно, двигатель, приводящий во вращение подобные механизмы, может устойчиво работать только в диапазоне изменения скольжения $0 < s < s_{cr}$. При $s > s_{cr}$, т.е. на участке M_1n механической характеристики 1, устойчивая работа становится невозможной.

При работе электродвигателя совместно с исполнительным механизмом, имеющим вентиляторную характеристику, устойчивая работа возможна и на участке $M_{max}n$ механической характеристики 1, т.е. при $s > s_{cr}$. Однако допускать работу при скольжениях, больше критического, не следует, так как при этом резко увеличиваются потери мощности в обмотке ротора (4.21), уменьшается КПД и увеличивается нагрев двигателя.

При эксплуатации возможны не только кратковременные небольшие изменения M_{ct} , но и существенные увеличения нагрузочного момента при резких изменениях режима работы. Когда двигатель работает при скольжении, меньшем s_{cr} , но близком к нему, случайная перегрузка двигателя может привести к его остановке при $M_{ct} > M_{max}$. Поэтому максимальный момент иногда называют «опрокидывающим моментом».

При больших перегрузках устойчивость работы двигателя обеспечивают путем выбора номинального момента $M_{ном} < M_{max}$. Двигатели, предназначенные для работы с большими перегрузками (крановые, металлургические и т.п.), должны иметь большую перегрузочную способность (см. подразд. 4.11). Для увеличения пере-

грузочной способности двигателя следует уменьшать индуктивные сопротивления обмоток, т.е. числа витков обмоток статора и ротора, а это приводит к возрастанию магнитного потока (и следовательно, к увеличению сечения магнитопровода) и тока холостого хода. Поэтому двигатели с повышенным значением k_M имеют большие габаритные размеры и массу, а ток холостого хода у них достигает 40...60% номинального. Большое значение для обеспечения устойчивой работы асинхронных двигателей имеет качество электроснабжения. Поскольку вращающий момент асинхронного двигателя зависит от питающего напряжения в квадрате, то даже незначительное снижение напряжения уменьшает максимальный момент, а значительное уменьшение может вызвать остановку двигателя. Стандартом установлено, что длительное изменение напряжения в электрических сетях, питающих силовое оборудование, не должно отличаться от номинального более чем на -5 и +10%.

4.16. Регулирование частоты вращения

Под регулированием понимают такое изменение частоты вращения ротора, которое происходит при воздействии на двигатель эксплуатирующего персонала. При этом предполагается, что механическая характеристика нагрузки при регулировании остается прежней. Проблема регулирования частоты вращения асинхронных двигателей имеет важнейшее эксплуатационное значение. В целом ряде отраслей промышленности и сельского хозяйства к регулировочным характеристикам двигателей предъявляются весьма высокие требования как в отношении пределов и плавности регулирования, так и его экономичности. В отношении регулировочных характеристик асинхронные двигатели уступают двигателям постоянного тока тем больше, чем ниже пределы регулирования, поэтому в установках с повышенными требованиями к регулировочным свойствам электродвигателя используют двигатели постоянного тока, а не асинхронные двигатели.

Поскольку частота вращения ротора $n = n_1(1 - s)$, ее можно регулировать двумя способами: путем изменения частоты вращения магнитного поля n_1 и изменением скольжения s .

Изменить частоту вращения $n_1 = 60f_1/p$ можно двумя способами:

- изменением частоты тока f_1 ;
- изменением числа пар полюсов p обмоток двигателя;

Изменить скольжение s можно тремя способами:

- изменением напряжения U_1 ;
- введением добавочного активного сопротивления R_2 в цепь ротора, дополнительных реактивных сопротивлений в цепь ротора (в двигателях с фазным ротором);

• введенном дополнительной ЭДС скольжения в цепь ротора с помощью электрических или электромеханических каскадных соединений асинхронной машины (в двигателях с фазным ротором).

Регулирование частоты вращения изменением частоты тока f_1 . Такое регулирование может быть осуществлено лишь при питании двигателя от источников с независимо регулируемой частотой, в качестве которых применяют синхронные генераторы с регулируемой частотой вращения; электромашинные или статические, выполненные на управляемых полупроводниковых вентилях (тиристорах), преобразователи частоты. Для обеспечения высокой жесткости механической характеристики и достаточной перегрузочной способности необходимо одновременно с частотой тока f_1 регулировать напряжение U_1 с тем, чтобы магнитный поток оставался постоянным $\Phi \sim U_1/f_1 = \text{const}$, что соблюдается при частоте одного порядка с номинальной. При ненасыщенной стали регулирование напряжения в зависимости от частоты и момента должно осуществляться по закону

$$\frac{U_1'}{U_1} = \frac{f_1'}{f_1} \sqrt{\frac{M'}{M}}$$

где U_1' и M' — напряжение и момент, соответствующие частоте f_1' , а U_1 и M — частоте f_1 .

При $M = \text{const}$ это соотношение принимает вид

$$\frac{U_1'}{U_1} = \frac{f_1'}{f_1}$$

т.е. подводимое к двигателю напряжение должно изменяться пропорционально частоте.

При $P = \text{const}$ момент двигателя изменяется обратно пропорционально угловой скорости ω и, следовательно, частоте $\frac{M'}{M} = \frac{f_1}{f_1'}$ откуда

$$\frac{U_1'}{U_1} = \sqrt{\frac{f_1'}{f_1}}$$

В некоторых случаях требуется, чтобы момент M был пропорционален квадрату частоты f_1^2 , тогда

$$\frac{U_1'}{U_1} = \left(\frac{f_1'}{f_1}\right)^2$$

На практике эти соотношения приближительны, поскольку сталь машины практически всегда насыщена, а с изменением частоты вращения меняются условия охлаждения.

Частотное регулирование применяется преимущественно при групповом управлении асинхронными двигателями с короткозамкнутой обмоткой на роторе, например для регулирования частоты вращения двигателей, приводящих в движение ролики рольганга. Частотное регулирование частоты вращения позволяет плавно изменять частоту вращения в широком диапазоне (10:1 — 12:1), однако стоимость оборудования для регулирования частоты тока значительна.

Регулирование частоты вращения изменением числа пар полюсов p обмотки статора. Такое регулирование применяется в специальных асинхронных двигателях, получивших название многоскоростных. Эти двигатели имеют на статоре либо две обычные независимые обмотки, выполненные на разные числа полюсов, либо одну полюсно-переключаемую обмотку, отдельные части которой переключаются таким образом, что при этом изменяется число полюсов обмотки. Ротор двигателя выполняют с короткозамкнутой обмоткой. Двухскоростные двигатели выполняют обычно с одной обмоткой на статоре, с переключением числа полюсов в отношении 1:2. Трех- и четырехскоростные двигатели изготавливают с двумя обмотками на статоре, причем либо одна, либо обе обмотки выполняют с переключением числа полюсов.

Существует несколько способов переключения пар полюсов обмотки. На рис. 4.33 приведена простейшая схема (для одной фазы), позволяющая изменить число полюсов обмотки статора в 2 раза. Для этого каждую фазу обмотки статора разделяют на две части, которые переключают с последовательного соединения на параллельное. На рисунке видно, что при включении катушек 1—2 и 3—4 в две параллельные ветви число полюсов уменьшается в 2 раза, а следовательно, частота вращения магнитного поля увеличивается в 2 раза. При переключении число последовательно включенных витков в каждой фазе уменьшается вдвое, но, так

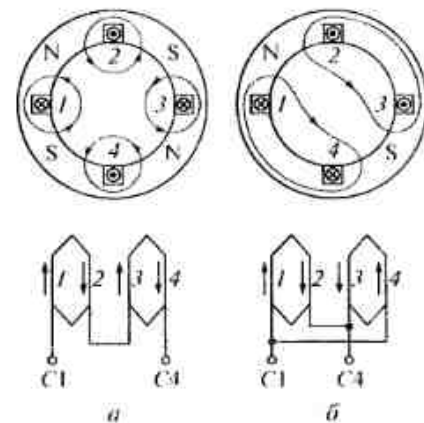


Рис. 4.33. Изменение числа полюсов переключением катушек фазы обмотки статора:

а — последовательное; б — параллельное включение катушек, 1, 2, 3, 4 — катушки

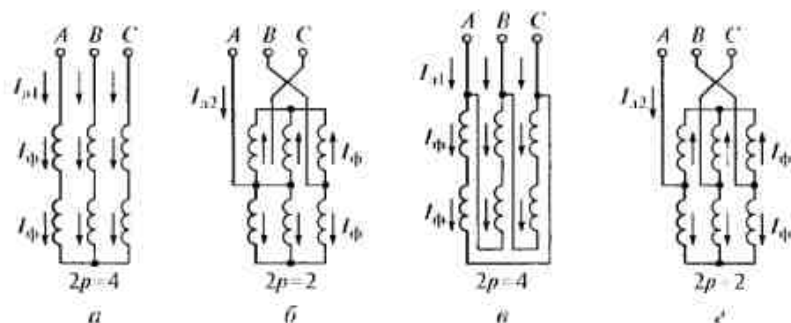


Рис. 4.34. Схемы соединения обмотки статора с переключением числа полюсов с отношением 2 : 1:

a и *б* — с постоянным моментом M ; *в* и *г* — с постоянной мощностью P

как частота вращения возрастает в 2 раза, ЭДС, индуцированная в фазе, остается неизменной. Следовательно, двигатель при обеих частотах вращения может быть подключен к сети с одинаковым напряжением.

На рис. 4.34 показаны наиболее часто употребляемые схемы соединений обмотки статора с переключением числа полюсов с отношением 2 : 1. Переключения, при которых момент $M = \text{const}$, приведены на рис. 4.34, *a* и *б*. В этом случае отношение потребляемых мощностей $P'_1/P_1 = 2$. Схемы, приведенные на рис. 4.34, *в* и *г*, обеспечивают приблизительно постоянную мощность ($P = \text{const}$), а соотношение $M'/M = 0,5$. Как видно на приведенных схемах, при переходе от меньшей частоты вращения к большей изменяется направление тока в половине полуобмоток фаз статора. Для сохранения направления вращения поля необходимо также переключить концы двух фаз обмотки.

К недостаткам многоскоростных двигателей следует отнести ступенчатое регулирование частоты вращения, большие габариты и массу (по сравнению с односкоростными двигателями), а следовательно, и большую стоимость.

Регулирование частоты вращения изменением величины питающего напряжения U_1 . Этот способ регулирования не имеет большого практического значения, поскольку питающее напряжение можно лишь уменьшать, а при этом значительно (4.32) уменьшается M_{max} , следовательно, диапазон регулирования весьма ограничен. Поэтому данный метод применяют лишь в двигателях весьма малой мощности (микродвигателях), так как они имеют относительно большое активное сопротивление обмотки ротора и соответственно большое критическое скольжение (4.31), т. е. максимум момента сдвигается в зону, близкую к $s = 1$. Однако, как было показано ранее, увеличение скольжения ведет к росту потерь мощности и снижению КПД (что не имеет решающего значения для микродвигателей).

Регулирование частоты вращения включением добавочных активных сопротивлений в цепь ротора. Такое регулирование осуществимо для двигателей с фазным ротором. Регулирующие реостаты включаются как пусковые, но предназначены для длительной работы. Как видно на рис. 4.16, *a*, при изменении добавочных активных сопротивлений в цепи ротора одному и тому же нагрузочному моменту $M_{\text{ном}}$ соответствуют различные скольжения s , большие, чем $s_{\text{ном}}$, соответствующее $R_{\text{н}} = 0$. Следовательно, установившаяся частота вращения двигателя будет уменьшаться. Этим методом можно регулировать частоту вращения в широких пределах. К недостаткам метода относятся: большие потери энергии в регулирующем реостате и очень «мягкая» механическая характеристика при большом добавочном сопротивлении в цепи ротора, при котором даже небольшому изменению нагрузочного момента соответствует значительное изменение частоты вращения.

Регулирование частоты вращения двигателей с фазным ротором каскадным соединением асинхронных машин. При таком регулировании потерь энергии в реостате нет. Суть этого метода состоит в том, что электрическую энергию, выделяющуюся в цепи ротора при скольжении (энергию скольжения), посредством преобразователя передают обратно в питающую сеть или вспомогательному двигателю, соединенному с основным электрически и механически и сообщаемому дополнительную механическую энергию валу основного асинхронного двигателя. Асинхронные каскады (рис. 4.35) используют в электроприводах с двигателями большой мощности при широком диапазоне регулирования частоты вращения.

Каскад двух асинхронных двигателей имеет существенные недостатки. Намагничивающий ток, потребляемый из сети, расходуется на создание магнитных полей двух машин, поэтому ток холостого хода каскада значительно превышает ток холостого хода одного двигателя. Это приводит к тому, что коэффициент мощности и перегрузочная способность каскада имеют пониженные значения.

Для получения частот вращения от 3000 до 6000 мин^{-1} применяются двигатели с двумя роторами. Кроме того, существует большое число каскадов разных типов с применением коллекторных машин переменного и постоянного тока, характеристики которых рассматриваются в соответствующих учебных пособиях.

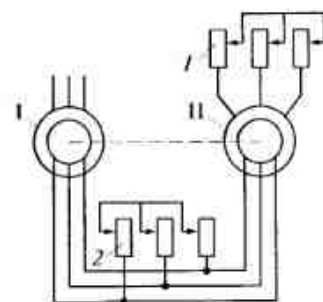


Рис. 4.35. Каскадное соединение двух асинхронных двигателей (I и II):

1, 2 — пусковые реостаты

4.17. Работа асинхронных двигателей при условиях, отличающихся от номинальных

В некоторых случаях, например при маломощных сетях, напряжение на зажимах двигателя и частота сети могут отличаться от номинальных. Кроме того, напряжение сети может оказаться несимметричным или несинусоидальным.

Работа асинхронного двигателя при отклонении напряжения от номинального и при постоянной частоте. Если пренебречь падением напряжения в обмотке статора, то можно считать $U \approx E_1 = C f \Phi_m$. Следовательно, уменьшение напряжения (что чаще бывает на практике, чем увеличение напряжения) в a раз приведет к пропорциональному уменьшению ЭДС E_1 и магнитного потока Φ_m . Если момент сопротивления на валу $M_{ср}$ задан и не зависит от частоты вращения, то вращающий момент M должен остаться постоянным. Из формулы (4.6) следует, что в этом случае скольжение должно измениться так, чтобы ток I_2 увеличился в a раз, т. е. скольжение, равное $\frac{P_{м2}}{P_{м1}} = \frac{m_2 I_2^2 R_2}{2\pi n_1 M}$ возрастет в a^2 раз. В свою очередь, частота вращения уменьшится в соответствии с соотношением (4.1). Кроме того, снижение напряжения приводит к понижению перегрузочной способности. На потери мощности уменьшение напряжения влияет следующим образом: механические потери практически не меняются; магнитные потери уменьшаются почти пропорционально квадрату напряжения; электрические потери в роторе увеличиваются пропорционально квадрату тока в его обмотке; потери в обмотке статора, с одной стороны, снижаются за счет уменьшения тока холостого хода I_0 , а с другой стороны, повышаются за счет увеличения тока I_2'' .

Таким образом, при уменьшении напряжения при неполной нагрузке КПД и $\cos \phi$ несколько увеличиваются, а затем быстро падают.

Работа асинхронного двигателя при отклонении частоты от номинальной, но при постоянном напряжении и вращающем моменте. Анализируя аналогично предыдущему случаю соотношение $U \approx E_1 = C f \Phi_m$, можно сделать вывод, что изменение частоты приведет к соответствующему изменению тока ротора и составляющей I_2'' тока статора. При уменьшении частоты магнитный поток Φ_m и ток холостого хода I_0 увеличиваются, а поскольку ток холостого хода I_0 практически реактивный, это приведет к снижению коэффициента мощности $\cos \phi$. Если момент задан, то ток I_2 изменяется почти пропорционально частоте. Из выражения для скольжения следует, что оно изменяется тоже пропорционально частоте. КПД зависит от частоты неоднозначно:

- механические потери изменяются пропорционально частоте;

- магнитные потери, с одной стороны, растут при увеличении частоты, а с другой стороны, уменьшаются в связи со снижением магнитного потока и, следовательно, индукции, причем вторая причина обычно имеет преобладающее значение;

- потери в обмотке ротора растут пропорционально квадрату частоты, а потери в обмотке статора зависят от соотношения между токами I_0 и I_2 , из которых первый уменьшается, а второй увеличивается.

В целом потери в двигателе возрастают, но одновременно с этим увеличивается и развиваемая полезная мощность $P_2 = 2\pi n M$, поэтому КПД двигателя мало меняется при изменении частоты.

Работа двигателя при несинусоидальном напряжении. В этом случае разлагают несинусоидальное напряжение в гармонический ряд и исследуют действие каждой гармонической отдельно. Получается как бы ряд двигателей, совмещенных на одном валу и, следовательно, вращающихся с одной и той же частотой n , но питаемых от сетей с разными напряжениями U_1, U_3, \dots, U_v и разными частотами $f_1, f_3 = 3f_1, \dots, f_v = v f_1$, где v — порядок временной гармонической. Гармоническим напряжениям соответствуют гармонические токи I_1, I_3, \dots, I_v , каждая из которых создаст первую и высшие гармонические МДС. Если иметь в виду только первые гармонические МДС, то частота их вращения в пространстве составляет $v n_1$, а скольжение, соответствующее v -й гармонической тока,

равно $s_v = \frac{v n_1 \pm n}{v n_1} \approx 1 \pm \frac{1}{v}$ (исключение составляют гармоники,

кратные трем, которые создают пульсирующее поле). Знак « \leftarrow » соответствует МДС, вращающимся в сторону основной МДС, а знак « \rightarrow » — вращающимся встречно. Появление высших гармонических тока и магнитного потока приводит к возникновению добавочных потерь в обмотках и стали машины. Кроме того, наличие высших гармонических приводит к появлению вращающихся и тормозящих моментов от взаимодействия токов и потоков одного порядка и колебательных моментов от взаимодействия между собой гармонических разных порядков. Вращающие и тормозящие моменты от высших гармонических несут существенны, а амплитуда колебательных моментов при небольшой нагрузке в режиме, близком к холостому ходу, может превышать основную электромагнитный момент двигателя, что приведет к неравномерности вращения ротора.

Каждому из двигателей, образованных гармоническими напряжениями, соответствует схема замещения, которая отличается от схемы замещения (рис. 4.14) для основной гармонической, своими параметрами. Индуктивные сопротивления возрастают в v раз, а $s = s_v$. (Для машин средней и большой мощности вследствие интенсивного вытеснения тока с увеличением частоты растут и актив-

ные сопротивления.) Отсюда следует, что $\cos \varphi$ невелик, т. е. токи, создаваемые высшими гармоническими напряжениями, являются почти чисто индуктивными. Это означает, что влияние высших гармонических напряжений эквивалентно некоторому увеличению индуктивных сопротивлений, приводящему к уменьшению $\cos \varphi$, КПД и M_{\max} . На практике влияние несинусоидального напряжения относительно мало сказывается на рабочих характеристиках двигателя, даже при значительном искажении кривой напряжения.

Работа двигателя при несимметричном напряжении. Несимметричную систему первичных напряжений можно разложить на системы прямой, обратной и нулевой последовательностей. Система напряжений нулевой последовательности при соединении обмоток по схеме треугольник или звезда с незаземленной нулевой точкой, как это и имеет обычно место в асинхронных двигателях, не оказывает влияния на работу двигателя и ее можно не брать во внимание.

Система обратной последовательности снижает полезный вращающий момент и создает дополнительные потери, в связи с чем необходимо ограничивать нагрузку двигателя.

4.18. Однофазные асинхронные двигатели

Двигатели этого типа уступают по своим технико-экономическим показателям трехфазным и применяются в случаях, когда питание может быть осуществлено только от однофазной сети переменного тока (в основном в различных бытовых электроприборах и в устройствах автоматики).

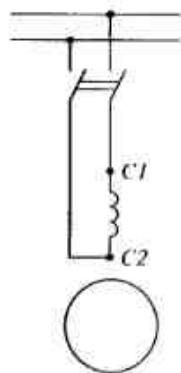


Рис. 4.36. Схема однофазного асинхронного двигателя: C1... C2 — обмотка статора

По своему устройству однофазный двигатель состоит из статора, в 2/3 пазов которого уложена однофазная основная обмотка, и короткозамкнутого ротора. Заполнение обмоткой всех пазов статора неэффективно, поскольку прирост МДС и ЭДС незначителен по сравнению с увеличением расхода меди и электрических потерь в ней. Особенность работы однофазных асинхронных двигателей объясняется тем, что при включении однофазной обмотки статора C1—C2 в сеть (рис. 4.36) МДС статора создает не вращающийся, а пульсирующий магнитный поток с амплитудой Φ_{\max} , изменяющийся от $+\Phi_{\max}$ до $-\Phi_{\max}$. При этом ось магнитного потока остается неподвижной.

Как было показано в подразд. 3.4, пульсирующий магнитный поток с амплитудой Φ_{\max} можно разложить на два вращающихся в про-

двуположные стороны потока: $\Phi_{\text{пр}}$ и $\Phi_{\text{обр}}$, каждый из которых имеет равную амплитуду $\Phi_{\max}/2$, и вращается с частотой $n_{\text{пр}} = n_{\text{обр}} = 60f_1/p = n_1$. Будем называть поток $\Phi_{\text{пр}}$, вращающийся в направлении вращения ротора, прямым, а поток $\Phi_{\text{обр}}$ — обратным. Допустим, что ротор двигателя вращается против часовой стрелки, т. е. в направлении потока $\Phi_{\text{пр}}$. Частота вращения ротора n меньше частоты вращения магнитного потока n_1 , поэтому скольжение ротора $s_{\text{пр}}$ относительно $\Phi_{\text{пр}}$ равно $(n_1 - n)/n_1 = s$. Обратный поток $\Phi_{\text{обр}}$ вращается против ротора, поэтому частота вращения n относительно $\Phi_{\text{обр}}$ будет отрицательной. В этом случае скольжение ротора относительно $\Phi_{\text{обр}}$ будет равно

$$s_{\text{обр}} = \frac{n_1 - (-n)}{n_1} = \frac{n_1 + n}{n_1} = \frac{n_1 + n_1 - n_1 + n}{n_1} = \frac{2n_1 - (n_1 - n)}{n_1} = 2 - s.$$

Прямой $\Phi_{\text{пр}}$ и обратный $\Phi_{\text{обр}}$ магнитные потоки наводят в обмотке ротора ЭДС $E_{2\text{пр}}$ и $E_{2\text{обр}}$, которые создают соответствующие токи $I_{2\text{пр}}$ и $I_{2\text{обр}}$. Известно, что частота тока в обмотке ротора пропорциональна скольжению:

$$f_{2\text{пр}} = f_1 s_{\text{пр}}; \quad f_{2\text{обр}} = f_1 s_{\text{обр}} = f_1 (2 - s_{\text{пр}}).$$

Поэтому ток $I_{2\text{обр}}$, наводимый обратным магнитным потоком в обмотке ротора, имеет частоту $f_{2\text{обр}}$, намного превышающую частоту $f_{2\text{пр}}$ тока $I_{2\text{пр}}$, наведенного в обмотке ротора прямым магнитным потоком. В результате взаимодействия тока $I_{2\text{пр}}$ с прямым магнитным потоком $\Phi_{\text{пр}}$ на ротор действует электромагнитный момент $M_{\text{пр}}$, а ток $I_{2\text{обр}}$, взаимодействуя с магнитным потоком $\Phi_{\text{обр}}$, создает на роторе двигателя электромагнитный момент $M_{\text{обр}}$, направленный навстречу $M_{\text{пр}}$, т. е. против вращения ротора. Результирующий электромагнитный момент однофазного асинхронного двигателя

$$M = M_{\text{пр}} + M_{\text{обр}}.$$

При работе двигателя в пределах номинальной нагрузки, т. е. небольших значениях скольжения $s = s_{\text{пр}}$, электромагнитный момент создается в основном за счет момента прямого поля $M_{\text{пр}}$. Это объясняется тем, что $f_{2\text{обр}} \gg f_{2\text{пр}}$, следовательно, индуктивное сопротивление обмотки ротора $X_{2\text{обр}} = X_{2\text{обр}}$ току $I_{2\text{обр}}$ намного больше его активного сопротивления. В результате ток $I_{2\text{обр}}$, имеющий значительную индуктивную составляющую, оказывает сильное размагничивающее действие на обратный магнитный поток $\Phi_{\text{обр}}$, а коэффициент мощности $\cos \varphi_{2\text{обр}}$ невелик, поэтому тормозящее действие $M_{\text{обр}}$ в номинальном режиме весьма незначительно. На рис. 4.37 представлены моменты вращения однофазно-

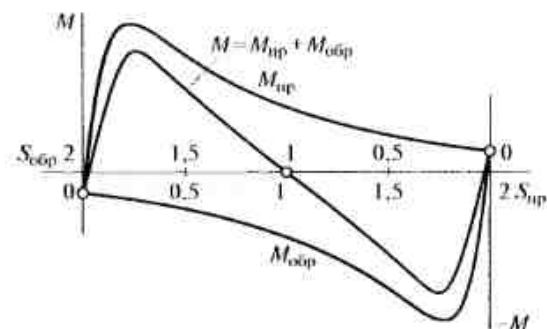


Рис. 4.37. Электромагнитные моменты однофазного асинхронного двигателя

го двигателя. Результирующий электромагнитный момент $M = f(s)$ получен сложением составляющих моментов $M_{пр}$ и $M_{обр}$. При неподвижном роторе $n_2 = 0$, что соответствует начальному пусковому моменту времени, скольжение $s_{пр} = s_{обр} = 1$ и $M_{пр} = M_{обр}$, поэтому начальный пусковой момент двигателя $M_0 = 0$. Для пуска однофазного двигателя необходимо привести ротор во вращение в ту или иную сторону, так как лишь при $s \neq 1$ $M_{пр} \neq M_{обр}$, т.е. результирующий электромагнитный момент приобретает некоторое значение.

Пуск однофазного асинхронного двигателя. Для создания начального пускового момента M_0 необходимо, чтобы в период пуска двигателя магнитное поле статора было не пульсирующим, а вращающимся, как в трехфазном двигателе. Для получения вращающегося магнитного поля на статоре двигателя помимо основной рабочей обмотки A в оставшейся незаполненной $1/3$ части пазов располагают вспомогательную пусковую обмотку B , ось которой обычно смещена относительно оси рабочей обмотки на 90 эл. град. (рис. 4.38). Кроме того, токи в обмотках I_A и I_B должны быть сдвинуты по фазе относительно друг друга во времени. Обе обмот-

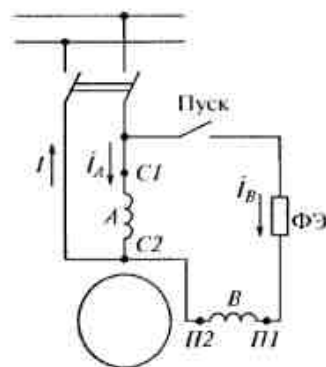


Рис. 4.38. Схема однофазного асинхронного двигателя с пусковой обмоткой:

A — рабочая обмотка; B — пусковая обмотка; $\Phi Э$ — фазосмещающий элемент; $C1, C2, П1, П2$ — соответственно начала и концы фаз обмоток

ли включают в одну сеть. Для получения необходимого сдвига токов по фазе в цепь пусковой обмотки (П1 — П2) вводят фазосмещающий элемент $\Phi Э$: активное сопротивление, индуктивность или емкость. После того как частота вращения двигателя достигнет значения, близкого к номинальному, пусковую обмотку B отключают. Таким образом, на время пуска однофазный двигатель становится двухфазным. Условия и процесс создания кругового вращающегося магнитного поля в двухфазной машине указаны в подразд. 3.4. В машине с двумя обмотками круговое вращающееся поле можно получить при любом пространственном сдвиге обмоток θ . Для этого необходимо, чтобы сдвиг токов обмоток во времени был равен $\beta = 180^\circ - \theta$, а МДС обмоток были равны $I_A w_A = I_B w_B$. Однако максимальное вращающееся поле получается при сдвиге обмоток на 90 эл. град.

Сравнение свойств фазосмещающих элементов показывает, что наилучшим из них является емкость, поскольку лишь она при включении в цепь пусковой обмотки позволяет получить сдвиг фаз между токами рабочей и пусковой обмотки 90 эл. град. Если в этом случае обе обмотки образуют одинаковые МДС, то при включении двигателя в сеть будет создано круговое вращающееся поле и обеспечены хорошие пусковые свойства ($k_{ин} = 1,6 \dots 2$). Однако применение емкости в качестве фазосмещающего элемента иногда ограничено значительными габаритами конденсаторов, так как при пуске двигателя требуется сравнительно большая емкость. В случаях, когда не требуется больших пусковых моментов, для этих целей широко используют активное сопротивление, превышающее активное сопротивление рабочей обмотки. Кроме того, часть пусковой обмотки наматывают бифилярно, чем снижают ее индуктивность и повышают активное сопротивление (бифилярная часть обмотки, состоящая из одинакового числа витков, противоположно намотанных, и прямого направления намотки, магнитного поля не создает, поэтому не обладает индуктивностью и выполняет функции добавочного активного сопротивления). Пусковые свойства двигателей с повышенным активным сопротивлением пусковой обмотки позволяют получить кратность пускового момента $k_{ин} = 1 \dots 1,5$ при кратности пускового тока $k_{ин} = 5 \dots 9$.

Асинхронные конденсаторные двигатели. Эти двигатели имеют на статоре двухфазную обмотку, представляющую собой две однофазные обмотки (главную и вспомогательную), занимающие одинаковое число пазов и сдвинутые в пространстве друг относительно друга на 90 эл. град. Ротор двигателя выполняют короткозамкнутым. Главная обмотка включается непосредственно в однофазную сеть, вспомогательная обмотка включается в эту же сеть через рабочий конденсатор. Наличие рабочего конденсатора создает сдвиг фаз между токами главной и вспомогательной обмотки. В отличие от рассмотренного выше однофазного асинхронно-

го двигателя вспомогательная обмотка остается включенной в течение всей работы. Таким образом, если в однофазном асинхронном двигателе по окончании процесса пуска возникает пульсирующее магнитное поле, то конденсаторный двигатель работает с вращающимся магнитным полем, близким к круговому, поэтому по своим рабочим качествам однофазные конденсаторные двигатели приближаются к трехфазным асинхронным двигателям. Однако кратность пускового момента таких двигателей невелика (порядка 0,5). Для повышения пускового момента конденсаторного двигателя кратковременно параллельно рабочей емкости включают пусковую емкость (причем $C_{\text{пуск}} \gg C_{\text{раб}}$), которая отключается при достижении ротором частоты вращения 60...70 % синхронной частоты.

Работа трехфазного асинхронного двигателя от однофазной сети. Однофазный асинхронный двигатель можно получить из трехфазного, если одну из трех фаз статора, например *C*, отключить от сети, а фазы *A* и *B* соединить последовательно или параллельно между собой. Для пуска можно использовать как пусковое сопротивление, так и емкость. В этом случае мощность однофазного двигателя составляет примерно 70 % мощности трехфазного двигателя.

Существуют и другие виды однофазных асинхронных двигателей (с экранированными явновыраженными полюсами, с расщепленными полюсами и т.д.).

Более подробно однофазные асинхронные двигатели рассматриваются в учебной литературе по микромашинам.

4.19. Электрическое торможение асинхронных двигателей

В ряде установок требуется быстрое и плавное торможение двигателя, происходящее в точном соответствии с заданной скоростной диаграммой. Торможение можно осуществить механическим или электрическим путем. Электрическое торможение имеет ряд преимуществ перед механическим, особенно в случаях, когда требуется точное регулирование момента останова и плавность операции.

Существуют три главных способа электрического торможения асинхронных двигателей:

- режим противовключения или режим электромагнитного тормоза;
- режим генераторного торможения;
- режим динамического торможения.

Торможение двигателя противовключением. При торможении двигателя по этому способу изменяют направление вращения поля путем переключения любых двух линейных проводов, подводи-

мых к статору. В этом случае ротор вращается против поля со скольжением $s > 1$. В двигателе с фазным ротором для ограничения тока противовключения в цепь ротора включают добавочное активное сопротивление R_r . Как известно (см. подразд. 4.11), с увеличением R_r максимум момента, оставаясь постоянным по значению, сдвигается в сторону все больших положительных скольжений. Следовательно, можно выбрать такое сопротивление R_r , при котором асинхронный двигатель, перейдя в режим электромагнитного тормоза, разовьет необходимый тормозной момент. Однако при этом кривые $M = f(s)$ становятся очень пологими, поэтому при торможении статор двигателя включается в сеть как однофазный, а две фазные обмотки замыкаются накоротко, что особенно важно, так как без короткозамкнутого контура получился бы обычный однофазный двигатель, не имеющий тормозного режима. В этом случае все происходит так, как если бы на одном валу было два трехфазных двигателя, развивающих моменты, направленные навстречу друг другу. Тормозные характеристики этого способа благоприятны. Недостатками схемы являются:

- худшее использование однофазной машины по сравнению с трехфазной;
- неблагоприятное влияние однофазной нагрузки на симметрию напряжения трехфазной сети;
- пониженный коэффициент мощности машины.

Однако в большинстве случаев эти недостатки не имеют существенного значения.

Режим генераторного торможения. Этот режим применяется главным образом в двигателях с переключением полюсов. Если двигатель работает при меньшем числе полюсов $2p$, т.е. при большей частоте вращения n_1 , то, переключая его на большее число полюсов $2 - 2p$, осуществляют генераторное торможение в диапазоне от n_1 до $n_1/2$. Для дальнейшего торможения двигатель следует перевести в режим противовключения. Режим генераторного торможения используется и в подъемно-транспортных сооружениях при спуске тяжелых грузов. В этом случае машина отдает обратно в сеть энергию, сообщаемую ей спускающимся грузом.

Режим динамического торможения. В рассматриваемом режиме статор асинхронной машины отключают от сети переменного тока, а затем две его фазы подключают к источнику постоянного тока. При этом в машине появляется постоянный магнитный поток возбуждения, индуцирующий в обмотках ротора переменную ЭДС. Чтобы создать тормозной момент, к обмоткам ротора подключают активное сопротивление, в котором гасится энергия, возникающая в результате торможения приводного механизма. В режиме динамического торможения асинхронная машина превращается в автономный синхронный генератор, работающий на реостат.

4.20. Асинхронный генератор

При вращении ротора асинхронной машины, включенной в сеть с источниками реактивной мощности (перевозбужденные синхронные генераторы, двигатели, компенсаторы, а также конденсаторы), с частотой, большей частоты вращения магнитного поля ($n > n_1$), ЭДС в обмотке ротора изменяет свое направление на противоположное по сравнению с двигательным режимом. Вследствие этого изменяют свое направление активные составляющие токов I_1 и I_2 (по сравнению с двигательным режимом), машина отдает активную мощность в сеть и работает в режиме генератора. Необходимую для образования вращающегося магнитного поля реактивную мощность асинхронный генератор потребляет из сети, нагружая дополнительным реактивным током синхронные машины, которые включены в сеть параллельно с ним. Это потребление реактивной мощности является основным недостатком асинхронного генератора, препятствующим его широкому распространению.

На круговой диаграмме асинхронной машины, приведенной на рис. 4.21, *а*, режимам, при которых асинхронный генератор отдает активную мощность в сеть, соответствуют точки на дуге окружности токов, расположенной ниже оси абсцисс. Линия *ОК* определяет механическую мощность $P_{\text{м}} = P_2$, которая должна быть подведена от приводного двигателя асинхронному генератору. Например, для тока, определяемого отрезком O_1D_2 , механическая мощность пропорциональна отрезку D_2b , а полезная — отрезку D_2c (см. рис. 4.21, *а*).

Асинхронные генераторы выполняются преимущественно с короткозамкнутой обмоткой на роторе и имеют весьма ограниченное применение, главным образом на малых гидроэлектростанциях, работающих без обслуживающего персонала, так как они могут эксплуатироваться без систем регулирования частоты и напряжения.

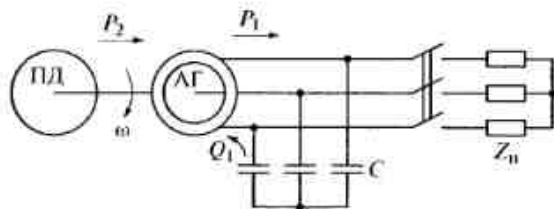


Рис. 4.39. Схема включения асинхронного генератора при работе с самовозбуждением:

ПД — приводной двигатель; АГ — асинхронный генератор; *C* — конденсаторы; Z_n — сопротивление нагрузки

Кроме работы параллельно с сетью переменного тока, имеющей источники реактивной мощности, возможна автономная работа асинхронного генератора в режиме самовозбуждения (от потока остаточного магнетизма ротора), если к выводам статора подключить конденсаторы, которые должны служить источником реактивной мощности Q_1 , необходимой для возбуждения магнитного поля в генераторе (рис. 4.39). При работе на активно-индуктивную нагрузку конденсаторы служат источником реактивной мощности и для нагрузки.

Мощность конденсаторов в схеме асинхронного генератора с самовозбуждением близка к его номинальной активной мощности, поэтому они дорогие и находят применение лишь в специальных установках.

4.21. Испытания асинхронных машин

Для асинхронных двигателей стандарт предписывает программу приемочных испытаний:

измерения сопротивления изоляции обмоток по отношению к корпусу машины и между обмотками и сопротивлений обмоток при постоянном токе в практически холодном состоянии;

определение коэффициента трансформации (для двигателей с фазным ротором);

испытания изоляции обмоток на электрическую прочность относительно корпуса машины и между обмотками и на электрическую прочность межвитковой изоляции обмоток статора и фазного ротора;

определение тока и потерь холостого хода, тока и потерь короткого замыкания;

испытания машины при повышенной частоте вращения и на нагревание; определение КПД, коэффициента мощности и скольжения;

испытание на кратковременную перегрузку по току; определение максимального вращающего момента, минимального вращающего момента в процессе пуска, начального пускового вращающего момента и начального пускового тока (для двигателей с короткозамкнутым ротором);

измерение вибраций и уровня шума.

В программу приемосдаточных испытаний асинхронных двигателей входят первые семь перечисленных операций программы приемочных испытаний.

Определение коэффициента трансформации, тока и потерь холостого хода и короткого замыкания. Коэффициент трансформации находят, используя измерения линейных напряжений на зажимах обмоток статора и на кольцах неподвижного ротора с ра-

замкнутой обмоткой. Для низковольтных электродвигателей (с номинальным напряжением до 660 В включительно) к обмотке статора подводят номинальное линейное напряжение, а для электродвигателей на большее номинальное напряжение допустимо определение коэффициента трансформации при пониженном напряжении.

Коэффициент трансформации вычисляют как отношение фазных напряжений статора $U_{\phi 1}$ и ротора $U_{\phi 2}$:

$$k = U_{\phi 1} / U_{\phi 2}.$$

Для определения тока и потерь холостого хода испытания производят в режиме холостого хода при установившемся тепловом состоянии частей электродвигателя.

Если невозможно определить установившееся тепловое состояние подшипников непосредственным измерением их температуры, это достигают путем вращения электродвигателей без нагрузки при номинальной частоте вращения в течение времени, указанного в табл. 4.1.

После окончания обкатки добиваются постоянства потребляемой мощности.

При опыте холостого хода измеряют линейное напряжение $U_{\text{ли}}$ между всеми фазами, частоту сети f_1 , линейный ток $I_{\text{ли}}$ статора в каждой фазе и потребляемую мощность.

Опыт холостого хода начинают проводить с напряжения, равного 130 % номинального.

Если двигатели выполнены с насыщенной магнитной цепью, то при указанном напряжении резко возрастает ток холостого хода.

В этом случае допускается начинать опыт с напряжения, равного 110 % номинального.

В процессе опыта обычно проводят 9...11 измерений при различных значениях линейного напряжения. Для правильного опре-

Таблица 4.1

машин, кВт (кВ-А)	Продолжительность вращения машин, мин	
	при периодических испытаниях с подшипниками качения или при приемосдаточных испытаниях с подшипниками скольжения	при приемосдаточных испытаниях с подшипниками качения
До 1	10	5
1—10	30	15
10—100	60	30
100—1 000	120	60
Свыше 1 000	240	120

деления потерь в обмотке статора при опыте холостого хода необходимо непосредственно после опыта измерить сопротивление обмотки статора.

Коэффициент мощности холостого хода

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_{\text{ли}} I_{\text{ли}}}$$

Результаты опыта холостого хода обычно изображают графически — путем построения зависимостей потерь P_0 , фазного тока I_0 и коэффициента мощности $\cos \varphi_0$ в функции напряжения.

При приемосдаточных испытаниях измеряют ток и потери холостого хода лишь при номинальном значении напряжения.

Для определения тока и потерь короткого замыкания при опыте короткого замыкания на статор подается напряжение, ротор затормаживается, а в случае фазного ротора обмотки закорачиваются накоротко на кольцах. Напряжение, подаваемое на статор, должно быть практически симметричным и номинальной частоты. В процессе опыта одновременно измеряют подводимое напряжение, ток статора (линейный ток I_k короткого замыкания), потребляемую мощность P_k , начальный пусковой момент (для электродвигателей малой и средней мощности), а непосредственно после опыта определяют сопротивление R_k обмотки статора между выводами, соответствующее температуре в конце опыта. Начальный пусковой момент $M_n = M_k$ во время опыта измеряют динамометром или весами на конце рычага (которым заторможен ротор), закрепляемым шпирной машиной. Для электродвигателей большой мощности его рассчитывают по измеренным потерям P_k короткого замыкания (численно равным мощности, потребляемой при опыте):

$$M_k = \frac{0,9 \cdot 9550 P_{k, \text{м}2}}{n_1}$$

где 0,9 — коэффициент, ориентировочно учитывающий действие высших гармоник; $P_{k, \text{м}2}$ — потери в обмотке ротора при опыте короткого замыкания, кВт.

Потери в обмотке ротора при опыте короткого замыкания

$$P_{k, \text{м}2} = P_k - P_{k, \text{ст}} - P_c$$

где $P_{k, \text{ст}}$ — потери в обмотке статора при опыте короткого замыкания, кВт; P_c — потери в стали, определяемые из опыта холостого хода, кВт.

Потери в обмотке статора при опыте короткого замыкания

$$P_{k, \text{ст}} = I_k^2 R_{\text{ст}} / 1000.$$

Для определения зависимостей (необходимых при приемочных и других полных испытаниях) потребляемой мощности P_k , тока I_k , коэффициента мощности $\cos \varphi_k$ и начального пускового момента M_k от напряжения U_k , приложенного к двигателю в режиме короткого замыкания, проводят 5...7 отсчетов при разных значениях этого напряжения.

В процессе приемосдаточных испытаний ток и потери короткого замыкания измеряют при одном значении напряжения короткого замыкания:

$$U_k = U_{ном}/3,8,$$

где $U_{ном}$ — номинальное напряжение двигателя.

При определении опыта короткого замыкания первый отчет рекомендуется проводить при следующих значениях напряжения короткого замыкания в зависимости от U_n :

$U_{ном}, В$	127	220	380	440	500	660	3000	6000	10000
$U_k, В$	33	58	100	115	130	173	800	1600	2640

Второй отчет — при напряжении $(1 \pm 0,1)U_{ном}$ (для электродвигателей малой и средней мощности); для электродвигателей большой мощности подавать при опыте номинальное напряжение обычно невозможно вследствие больших пусковых токов, поэтому напряжение может быть ниже, но не меньше $0,4U_{ном}$. Требуемое напряжение U_k подают начиная с минимального значения. Во избежание чрезмерного нагрева обмоток токами короткого замыкания рекомендуется отчет по приборам при каждом значении подведенного напряжения производить за время не более 10 с, а после отчета двигатель сразу отключать.

Для двигателей с фазным ротором, для которых максимальный вращающий момент определяют по круговой диаграмме, ток короткого замыкания (при опыте короткого замыкания) должен быть не менее 2,5-кратного от номинального, чтобы правильно оценить насыщение путей потоков рассеяния при токах, соответствующих максимальному моменту. При испытании двигателей свыше 1000 кВт ток короткого замыкания должен быть не менее 2-кратного от номинального.

По данным опыта короткого замыкания определяют коэффициент мощности:

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3}U_k I_k}$$

Коэффициент мощности можно найти и по отношению показаний двух ваттметров (α_1/α_2), воспользовавшись рис. 4.40. Для этого на оси ординат откладывают полученное значение отношений двух ваттметров (α_1 и α_2 -деления шкалы ваттметров) с учетом знака

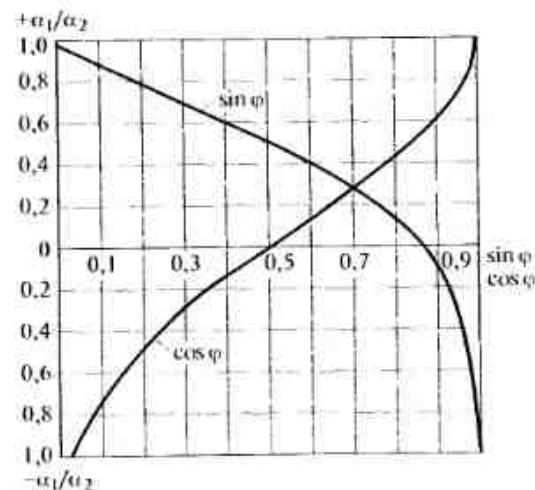


Рис. 4.40. Определение коэффициента мощности по отношению показаний двух ваттметров

этого отношения, проводит для этого значения горизонтальную прямую до пересечения с линией $\cos \varphi$ (или $\sin \varphi$) и по точке пересечения по шкале оси абсцисс определяют искомое значение $\cos \varphi$ (или $\sin \varphi$).

Для графического изображения результатов опыта короткого замыкания откладывают в функции от напряжения следующие величины: ток короткого замыкания I_k , потери короткого замыкания P_k , коэффициент мощности $\cos \varphi_k$ и вращающий момент при коротком замыкании M_k .

Если опыт короткого замыкания проведен при пониженном напряжении, то при определении тока и вращающего момента, соответствующих номинальному напряжению, вводят поправку на насыщение путей потоков рассеяния, строя зависимость тока короткого замыкания от напряжения (рис. 4.41). Зависимость $U_k \leq U \leq U_{ном}$ считают линейной, касательной к точке (I_k, U_k) . Определяют точку пересечения касательной с осью абсцисс U'_k . Тогда ток короткого замыкания при номинальном напряжении $I_{к,ном}$, называемый начальным пусковым током, находят по формуле

$$I_{н} = I_{к,ном} \frac{(U_{ном} - U'_k) I_k}{U_k - U'_k}$$

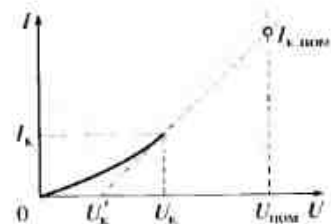


Рис. 4.41. Зависимость $I=f(U)$ учета насыщения путей потоков рассеяния

где $U_{ном}$ — номинальное напряжение, В; I_k, U_k — соответственно наибольшие ток, А, и напряжение, В, измеренные в процессе опыта.

Вращающий момент при коротком замыкании, соответствующий номинальному напряжению, называемый начальным пусковым вращающим моментом $M_{к.ном}$, определяют по формуле

$$M_n = M_{к.ном} = (I_{к.ном}/I_k)^2 M_{к.к}$$

где $M_{к.к}$ — вращающий момент, измеренный при наибольшем напряжении опыта короткого замыкания, Н·м.

Начальный пусковой ток и начальный пусковой момент можно также определить при пуске, а начальный пусковой момент, кроме того, измеряют при снятии статической кривой момента. Значение начального пускового момента зависит от относительного положения зубцов статора и ротора в момент измерения. Поэтому за начальный пусковой момент принимают наименьшее из измеренных его значений.

Определение КПД, коэффициента мощности и скольжения по рабочей характеристике. Рабочая характеристика, т. е. зависимость потребляемой мощности, тока, скольжения, КПД и коэффициента мощности от полезной мощности, снимается при неизменных и номинальных приложенных напряжении и частоте, изменяющейся нагрузке от холостого хода до 110% номинальной (5...7 значений), и температуре, близкой к установившейся при номинальной нагрузке.

В процессе опыта измеряют линейные напряжения $U_{ном}$ и ток I , потребляемую мощность P_1 и скольжение s двигателя. По результатам измерений определяют коэффициент мощности. Для контроля коэффициент мощности находят по отношению показаний двух ваттметров (см. рис. 4.40).

Сумма потерь асинхронного двигателя равна

$$\sum P = P_{ст} + P_{р} + P_c + P_{мх} + P_{доб}$$

где $P_{ст}$, $P_{р}$, P_c , $P_{мх}$, $P_{доб}$ — потери в обмотках статора, ротора и стали, механические и добавочные потери соответственно.

Если рабочую характеристику невозможно снять при номинальном напряжении, то ее определяют при напряжении $0,5U_{ном} \leq U_r \leq 1,15U_{ном}$. Полученные результаты испытаний в этом случае можно привести к номинальному напряжению по следующим формулам:

$$s_1 = s_r; \quad P_1 = P_{1r}(U_{ном}/U_r)^2; \quad I = I_r(U_{ном}/U_r) + \Delta I_0;$$

$$\Delta I_0 = I_0 \sin \varphi_0 - I_{0r}(U_{1r}/U_r) \sin \varphi_{0r}.$$

где U_r ; s_r , P_{1r} , I_r , I_0 , $\sin \varphi_0$ — значения соответственно скольжения, потребляемой мощности, тока, тока холостого хода и угол между

векторами тока и напряжения, измеренные при номинальном напряжении s_r , P_{1r} , I_r , I_{0r} , φ_{0r} — аналогичные значения при холостом ходе и напряжении.

Значение тока при номинальном напряжении рассчитывают по формуле

$$I = \sqrt{I_r^2 (U_{ном}/U_r)^2 + 2I_r (U_{ном}/U_r) \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_r} \Delta I_0 + \Delta I_0^2}.$$

Определение максимального вращающего момента. Максимальный вращающий момент — один из основных показателей асинхронной машины, так как только кратность максимального вращающего момента и превышение температуры частей электродвигателя ограничивают возможности повышения мощности двигателя данного габарита.

Поэтому определять значение максимального вращающего момента следует с высокой точностью.

Максимальный вращающий момент находят следующими способами: определением кривой вращающего момента при пуске; непосредственным измерением вращающего момента при нагрузке электродвигателя; вычислением вращающего момента по мощности на валу и частоте вращения при нагрузке электродвигателя (при этом мощность на валу находят при помощи тарированной нагрузочной машины или методом отдельных потерь).

При определении максимального вращающего момента измеряют соответствующее этому моменту скольжение (допускается применение тахометра).

Определение кривой вращающего момента при пуске. Этот способ обычно используется для нахождения максимального момента электродвигателей большой мощности, когда осуществить нагрузку испытуемого двигателя с помощью нагрузочной машины невозможно.

Для определения кривой вращающего момента испытуемый двигатель пускают вхолостую, а процесс пуска записывается с помощью осциллографа или какого-либо самописца. Основная трудность проведения этого опыта — кратковременность периода пуска электродвигателей. Для удлинения периода пуска увеличивают момент инерции испытуемого двигателя, соединяя его с другой электрической машиной, ротор которой служит добавочной маховой массой, или с тяжелым маховиком, либо за счет понижения подводимого к испытуемому двигателю напряжения, но не менее 0,5 от номинального.

Обычно фиксируется угловое ускорение, пропорциональное вращающему моменту.

При этом возникают следующие трудности. Напряжение в процессе пуска не меняется вследствие изменения пускового тока в функции скольжения, поэтому полученные значения вращающе-

го момента должны быть пересчитаны на номинальное напряжение пропорционально квадрату напряжения.

Кроме того, искажающее влияние на начальную часть процесса пуска оказывают переходные процессы при включении, а на машины с подшипниками скольжения — еще и высокое значение их начального момента трения. Для устранения искажающих воздействий прибегают к предварительному вращению испытуемого двигателя в противоположном направлении, затем, изменяя чередование фаз, реверсируют двигатель и записывают кривую вращающих моментов.

Масштаб момента определяют по значению начального пускового момента, получаемого из опыта короткого замыкания. При записи кривой момента при реверсировании начальной пусковой момент должен соответствовать частоте вращения, равной нулю.

Способ определения максимального вращающего момента непосредственным измерением вращающего момента при нагрузке. Этот способ наиболее точен, хотя для машин большой мощности трудно осуществим. В качестве нагрузки используют балансирную машину или электромагнитный тормоз. Рекомендуется определять максимальный момент при номинальном напряжении. Для электродвигателей мощностью свыше 100 кВт допускается определение максимального момента при пониженном напряжении с последующим пересчетом пропорционально квадрату отношения напряжений.

Обычно вследствие влияния насыщения показатель степени для пересчета вращающего момента превышает 2. Более точные результаты пересчета можно получить, определяя максимальный момент при нескольких значениях напряжения, и на основании этого найти показатель степени зависимости вращающего момента от напряжения.

Наиболее часто в качестве балансирной нагрузочной машины используют генератор постоянного тока. Если генератор работает с неизменными возбуждением и нагрузочным сопротивлением, то зависимость момента от частоты вращения будет прямолинейной, исходящей из начала координат, с угловым коэффициентом, пропорциональным квадрату магнитного потока Φ . Такой вид нагрузочной характеристики позволяет определить точку, в которой вращающий момент испытуемого двигателя имеет максимальное значение.

Однако часто приходится снимать всю кривую $M = f(s)$, включая ее неустойчивую часть, для оценки провалов в кривой моментов, вызванных влиянием синхронных и асинхронных моментов от высших гармонических.

В этом случае вид нагрузочных кривых должен быть иным, чтобы обеспечить устойчивые точки пересечения с кривой момента испытуемого двигателя. Этого можно добиться, например, изменяя

возбуждение генератора при работе его на общую сеть постоянного тока.

Вычисление максимального вращающего момента по мощности на валу и частоте вращения при нагрузке электродвигателя. Испытываемый асинхронный двигатель механически соединяют с генератором постоянного тока с независимым возбуждением, работающим на сеть с регулируемым напряжением. Изменение нагрузки двигателя производят регулированием напряжения сети, на которую работает нагрузочный генератор. Отсчеты производят при установившихся показаниях приборов.

Предварительно снимают две характеристики машины постоянного тока: холостого хода при постоянной частоте вращения в генераторном режиме и зависимость тока холостого хода от частоты вращения $I_0 = f(n)$ при постоянном значении тока возбуждения (это значение тока возбуждения остается неизменным при определении максимального вращающего момента) в двигательном режиме без испытываемого двигателя.

Для определения искомой кривой зависимости вращающих моментов асинхронного двигателя от частоты вращения при испытании измеряют ток якоря генератора постоянного тока I_a и частоту вращения испытываемого двигателя n (мин^{-1}).

Значение вращающего момента (Н·м) определяют по следующей формуле:

$$M = 9,55 E_0 (I_a + I_0) / n,$$

где E_0 — ЭДС холостого хода, В.

По полученной кривой $M = f(n)$ находят максимальный вращающий момент.

Определение минимального вращающего момента. Достаточно точное определение значения минимального вращающего момента асинхронного двигателя имеет важное значение, так как снижение его ниже допустимого по стандарту значения может привести к «застреванию» электродвигателя на малой частоте вращения при пуске под нагрузкой.

Такой режим работы близок к режиму короткого замыкания и является аварийным.

Минимальный вращающий момент определяют одним из следующих способов: по кривой вращающего момента, снятой с помощью регистрирующего прибора в процессе пуска; при непосредственной нагрузке балансирной машиной или генератором постоянного тока с независимым возбуждением, работающим на сеть с регулируемым напряжением (при нагрузке с помощью генератора постоянного тока вращающий момент определяют непосредственно или с помощью тарированного генератора) и при непосредственной нагрузке тарированной асинхронной машиной.

работающей в режиме противовключения и включенной в сеть с регулируемым напряжением.

Первые два способа рассмотрены выше и дополнительных пояснений не требуют. Третий способ основан на том, что вращающий момент нагрузочной асинхронной машины, работающей в режиме противовключения, остается практически постоянным в диапазоне скольжений от единицы до скольжения, соответствующего минимальному вращающему моменту, и зависит только от напряжения, подводимого к нагрузочной машине. Во избежание провалов в кривой $M = f(n)$ нагрузочной асинхронной машины в режиме электромагнитного тормоза рекомендуется в этой машине увеличить воздушный зазор между статором и ротором путем дополнительной обработки ротора по наружному диаметру, в цепь фазного ротора следует включить дополнительные активные сопротивления, а в цепь статора — дополнительно индуктивные сопротивления.

Испытания проводят по схеме, приведенной на рис. 4.42, следующим образом.

Нагрузочная асинхронная машина 3 работает в режиме противовключения, т.е. магнитное поле ее вращается в сторону, противоположную вращению ротора, что создает соответствующий тормозной момент для испытываемого двигателя 1 (см. рис. 4.42). Тормозной момент регулируют подводимым к нагрузочной машине напряжением при помощи источника 2 регулируемого напряжения.

Нагрузочную асинхронную машину следует заранее протарировать, т.е. определить зависимость вращающего момента на валу от подводимого к машине напряжения при работе ее в режиме электромагнитного тормоза.

При этом необходимо убедиться в отсутствии значительных колебаний величины тормозного момента нагрузочной машины при фиксированном напряжении в диапазоне скольжения s от 1 до 2.

Одну и ту же протарированную нагрузочную асинхронную машину вследствие постоянства момента при заданном напряжении можно использовать для испытания асинхронных двигателей с разными номинальными частотами вращения.

Для определения минимального вращающего момента на нагрузочную машину подают пониженное напряжение, соответствующее

определенному значению тормозного вращающего момента. Одновременно с нагрузочной машиной включают на номинальное напряжение испытываемый двигатель 1. Если минимальный вращающий момент испытываемого двигателя меньше тормозного вращающего момента нагрузочной машины, то агрегат задержится на промежуточной частоте вращения, а если минимальный вращающий момент испытываемого двигателя выше тормозного, то агрегат достигает полной частоты вращения испытываемого двигателя.

Пуски испытываемого двигателя производят несколько раз при разных тормозных моментах на валу, значения которых регулируются подводимым к нагрузочной машине напряжением. При испытании следует определять наибольшее значение тормозного момента, при котором агрегат достигает полной частоты вращения испытываемого двигателя.

Это значение принимают равным найденному значению минимального вращающего момента в процессе пуска испытываемого двигателя.

Контрольные вопросы

1. Как перевести асинхронный двигатель в режим работы генератором и электромагнитным тормозом?
2. Что определяет величину электромагнитного момента асинхронной машины?
3. Для каких целей применяют индукционный регулятор?
4. В чем состоит отличие Г-образной схемы замещения от Т-образной?
5. Как влияет активное сопротивление цепи ротора на механическую характеристику асинхронного двигателя?
6. Как построить рабочие характеристики асинхронного двигателя с помощью круговой диаграммы?
7. В каких случаях применяют двухклеточные асинхронные двигатели?
8. Как определить минимальный вращающий момент?

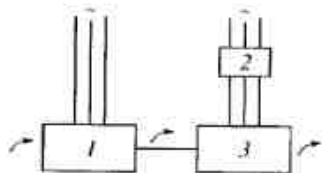


Рис. 4.42. Схема для определения минимального вращающего момента:

1 — испытываемый двигатель; 2 — источник регулируемого напряжения; 3 — нагрузочная асинхронная машина

5.1. Назначение и области применения синхронных машин

Мощность синхронных машин колеблется в широких пределах от долей ватт (устройства автоматики) до многих сотен тысяч киловатт (энергетические установки). В настоящее время существует потребность в строительстве сверхмощных тепловых и гидростанций с синхронными генераторами мощностью до 500 000 кВт и более, частоты вращения которых составляет 125...3 000 мин⁻¹ (в США при частоте 60 Гц соответственно 3 600 мин⁻¹). Специальные синхронные машины меньших мощностей изготавливают в более широком диапазоне частот вращения и частот сети.

Синхронные машины наиболее широко применяют в современных электрических установках как преобразователи механической энергии в электрическую, т.е. как генераторы.

Генераторы переменного тока, как правило, являются синхронными машинами. Конструкция синхронного генератора в основном определяется типом привода. В зависимости от этого различают турбогенераторы, гидрогенераторы и дизель-генераторы. Турбогенераторы приводятся во вращение паровыми или газовыми турбинами, гидрогенераторы — гидротурбинами, дизель-генераторы — двигателями внутреннего сгорания.

Синхронные машины используют также в электрических системах для генерирования реактивной мощности в целях улучшения коэффициента мощности сети и регулирования ее напряжения; в этом случае их называют *синхронные компенсаторы*.

Синхронные машины мощностью до 100 кВт и выше находят применение и в качестве электродвигателей для привода насосов, компрессоров, вентиляторов и других механизмов, работающих при постоянной частоте вращения. Синхронные двигатели широко используются в системах электроавтоматики, поскольку они обладают преимуществом перед другими типами двигателей: у них имеется жесткая связь между частотой сети и частотой вращения.

В электробытовых приборах (магнитофонах, проигрывателях, киноаппаратуре) и системах управления широкое применение получили различные синхронные микромашины — с постоянными магнитами, индукторные, реактивные, гистерезисные, шаговые.

5.2. Номинальные данные синхронных машин

Мощность, на которую рассчитана машина по условиям нагрева и длительной безаварийной работы, указывается на заводском щитке, прикрепленном к корпусу машины, и называется *номинальной*. Там же указываются и другие параметры, характеризующие работу машины в условиях, на которые она рассчитана, называемые *номинальными*.

На щитке синхронной машины приводятся следующие данные: тип машины, число фаз, частота тока (сети), Гц, полезная мощность, кВт или кВ·А, линейное напряжение, В, схема соединения фаз статора, ток статора и ротора, А, коэффициент мощности, частота вращения, мин⁻¹.

Номинальную полную мощность, кВ·А, для трехфазного генератора определяют по формуле

$$S_{ном} = \sqrt{3} U_{ном} I_{ном}$$

Номинальная активная мощность генератора — активная мощность, для работы с которой он предназначен в комплекте с турбиной. Ее значение, кВт, определяют по следующему выражению:

$$P_{ном} = S_{ном} \cos \varphi_{ном}$$

Номинальный ток ротора — наибольший ток возбуждения генератора, при котором обеспечивается отдача генератором его номинальной мощности при отклонении напряжения статора в пределах $\pm 5\%$ номинального значения и при номинальном коэффициенте мощности.

Номинальный коэффициент мощности у большинства синхронных генераторов равен 0,8...0,85. Однако в турбогенераторах мощностью свыше 800 МВт и в мощных вертикальных гидрогенераторах $\cos \varphi_n = 0,9$, а в капсульных гидрогенераторах $\cos \varphi_{ном} = 1$.

Номинальный КПД современных генераторов составляет 96,3...99%.

5.3. Устройство синхронных машин

Синхронной машиной называют такую машину переменного тока, частота вращения ротора которой равна частоте вращения первой гармонической поля статора и определяется частотой f переменного тока в обмотке статора и количеством пар p полюсов машины:

$$n = \frac{60f}{p} \quad (5.1)$$

Как правило, магнитное поле в синхронной машине создается обмоткой постоянного тока ротора, называемой *обмоткой возбуждения* (так как она создает в машине магнитный поток возбуждения), и обмоткой переменного тока статора, называемой *обмоткой якоря*. В синхронных машинах малой мощности вместо обмотки постоянного тока на роторе используют постоянные магниты (магнитоэлектрические синхронные машины) или же магнитное поле создается только переменным током обмотки статора (реактивные синхронные машины).

На рис. 5.1 изображена конструктивная схема трехфазной синхронной машины. По устройству ротора различают два типа синхронных машин: с *явнополюсным ротором*, в котором катушки обмотки постоянного тока размещены на выступающих полюсах, и с *неявнополюсным ротором*, в котором распределенная обмотка постоянного тока уложена в пазы ротора (рис. 5.2). Исполнение синхронной машины зависит от частоты ее вращения.

Поскольку паровые и газовые турбины для обеспечения наилучших технико-экономических показателей изготавливают на большие частоты вращения ($3\,000$ и $1\,500$ мин⁻¹), то на тепловых электростанциях (ТЭС), сжигающих традиционное обычное топливо, частота вращения агрегатов, как правило, составляет $3\,000$ мин⁻¹, а синхронные турбогенераторы имеют два полюса. В связи с особенностями технологического процесса на АЭС (низкими параметрами пара) применяют четырехполюсные генераторы с частотой вращения $1\,500$ мин⁻¹.

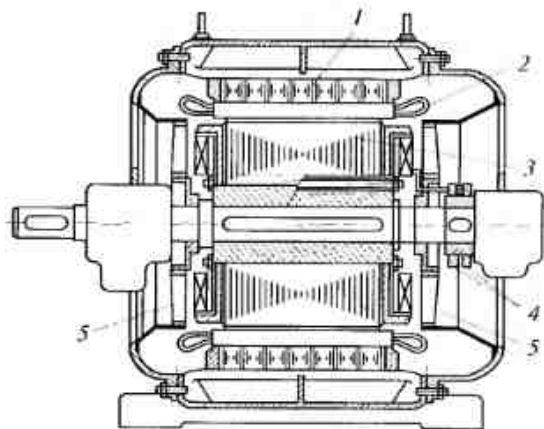


Рис. 5.1. Конструктивная схема трехфазной синхронной машины:
1 — сердечник статора; 2 — трехфазная обмотка статора; 3 — полюсы ротора с обмоткой постоянного тока; 4 — кольца для соединения обмотки ротора с источником постоянного тока; 5 — вентилятор

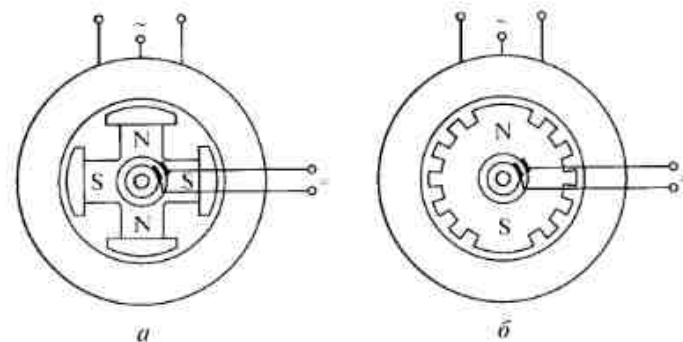


Рис. 5.2. Основные типы синхронных машин:
а — с явнополюсным ротором; б — с неявнополюсным ротором

Быстроходность турбогенератора определяет особенности его конструкции. Эти генераторы выполняются с горизонтальным валом (рис. 5.3). Ротор — самая ответственная часть турбогенератора, основной особенностью его работы являются большие линейные скорости на окружности, которые в четырехполюсных турбогенераторах достигают $100 \dots 125$ м/с, а в двухполюсных турбогенераторах большой мощности — $150 \dots 160$ м/с. При таких скоростях развиваются центробежные силы, создающие в некоторых частях ротора большие механические напряжения. Линейные скорости возрастают еще больше при внезапном сбросе нагрузки (например, при отключении генератора от сети), поскольку угловая частота вращения агрегата n , может достичь $(1,7 \dots 2,5)n$, где n — синхронная частота вращения. Поэтому ротор турбогенератора, работающий при больших механических и тепловых нагрузках, изготавливают неявнополюсным составным или из цельной поковки (рис. 5.4, а) специальной стали (хромоникелевой или хромоникельмолибденовой), обладающей высокими магнитными и механическими свойствами (сопротивлением разрыву порядка 80 кг/мм², пределом текучести $55 \dots 60$ кг/мм² и удлинением около 20%).

Для обеспечения механической прочности диаметр ротора не должен превышать $1,1 \dots 1,2$ м при частоте вращения $3\,000$ мин⁻¹. Длина бочки ротора также ограничена значением, равным $6 \dots 6,5$ м, по условиям допустимой величины статического прогиба вала и получения приемлемых вибрационных характеристик.

В осевом направлении по всей длине ротора просверлено центральное отверстие, предназначенное для исследования материала поковки в центральной ее зоне и, кроме того, разгружающее поковку от опасных внутренних напряжений.

Составной ротор набирается из трех частей — центральной части (бочки) и двух хвостовин (рис. 5.4, б). Основной проблемой,

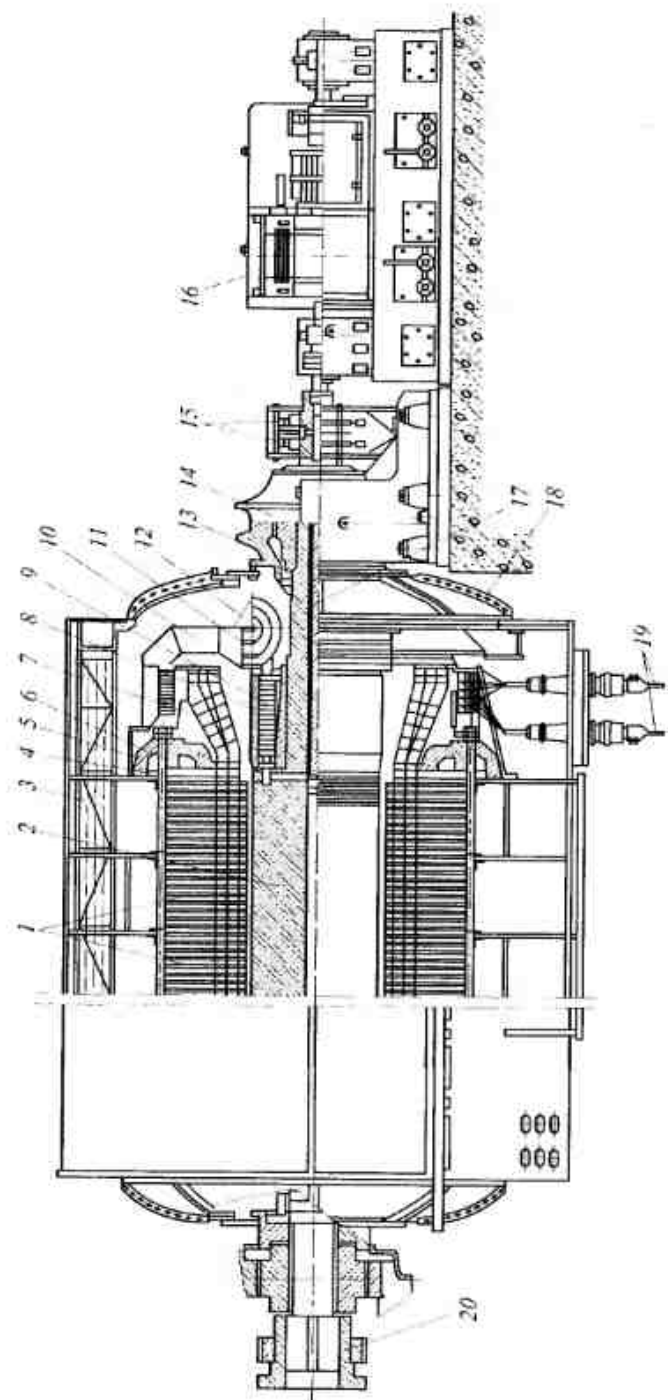


Рис. 5.3. Неявнополюсный генератор с водородным охлаждением:

1 — пакеты сердечника статора; 2 — ротор; 3 — охлаждающий; 4 — охлаждающий; 5 — охлаждающий; 6 — охлаждающий; 7 — охлаждающий; 8 — охлаждающий; 9 — охлаждающий; 10 — охлаждающий; 11 — обмотка ротора; 12 — вентилятор; 13 — направляющая воронка; 14 — масляное уплотнение; 15 — подшипник; 16 — контактные кольца; 17 — возбуждение; 18 — контактные кольца; 19 — выводы; 20 — соединительная муфта

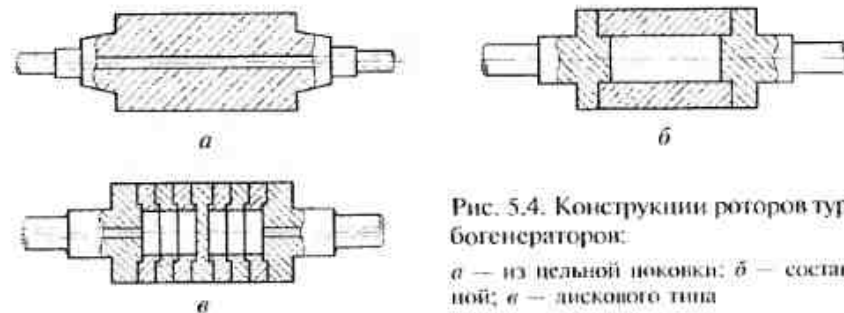


Рис. 5.4. Конструкции роторов турбогенераторов:

а — из цельной поковки; *б* — составной; *в* — дискового типа

связанной с выполнением ротора такого типа, является надежное сочленение трех частей между собой.

На рис. 5.4. *в* показан ротор дискового типа. Ротор такого типа относительно простой, но требует тщательной пригонки дисков, что при большом их числе (ширина диска примерно 10 см) значительно повышает стоимость конструкции. Внутренняя полость этого ротора может быть использована для подвода охлаждающего воздуха.

На поверхности неявнополюсного ротора примерно 1/3 полюсного деления свободна от пазов и образует так называемый большой зубец, через который проходит основная часть магнитного потока генератора. На остальной поверхности ротора фрезеруются пазы, заполняемые катушками обмотки возбуждения (рис. 5.5).

Обмотки в пазовой части закрепляются немагнитными легкими, но прочными клиньями из дюралюминия, профили сечения которых показаны на рис. 5.6. Лобовая часть обмотки, находящаяся вне пазов, предохраняется от смещения под действием центробежных сил с помощью бандажей. Поскольку бандажи должны выдерживать механические напряжения, возникающие не только от собственного веса, но и от давления обмотки из-за центробежных сил, обусловленных вращением ротора, их выполняют из немагнитной высокопрочной стали. Бандаж состоит из двух основных частей бандажного кольца и центрирующего кольца (рис. 5.7).

Центрирующее кольцо имеет двойное назначение: создает опору для бандажного кольца, центрируя его относительно оси ротора, и служит упором в осевом направлении для торцов лобовых частей роторной обмотки. Для предотвращения отделения колец от мест посадки под влиянием центробежных сил посадка центрирующего кольца на бандажное и бандажного кольца на центрирующее производится в горячем состоянии.

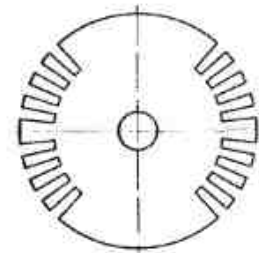


Рис. 5.5. Пазы ротора турбогенератора

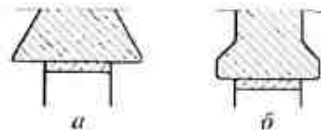


Рис. 5.6. Наиболее распространенные формы клиньев пазов ротора: *а* — для прямоугольных пазов; *б* — для трапециевидных пазов

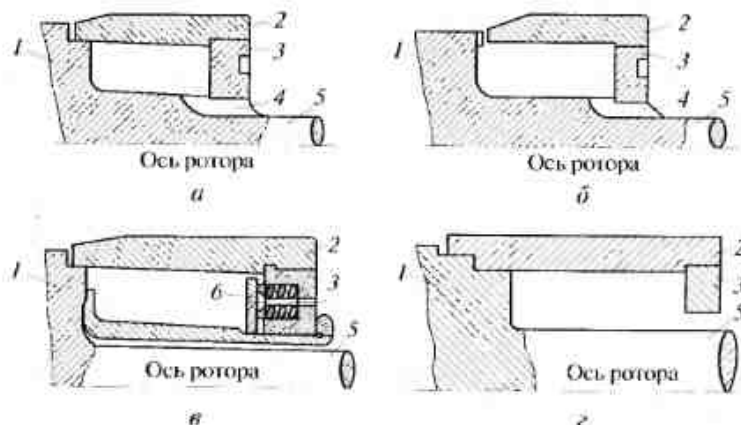


Рис. 5.7. Крепления бандажей ротора:

а и *б* — посадка на жесткое центрирующее кольцо; *в* — посадка на эластичное центрирующее кольцо; *г* — посадка на бочку ротора; 1 — сердечник ротора; 2 — бандажное кольцо; 3 — центрирующее кольцо; 4 — пружина; 5 — вал ротора; 6 — амортизирующий диск.

Посадку бандажа на ротор и его крепление можно осуществить несколькими способами. Бандаж можно посадить на центрирующее кольцо в этом случае между кольцом и бочкой ротора (рис. 5.7, *а*, *б* и *в*) имеется небольшой зазор (порядка 2 мм), а можно посадить на бочку ротора (рис. 5.7, *г*).

Для компенсации тепловых расширений роторной обмотки машины на напряжения 25, 50 и 100 МВт имеют амортизаторы.

Для изоляции лобовых частей от бандажа их можно покрыть чехлами из миканита. Улучшению охлаждения ротора способствуют алюминиевые седла, представляющие собой специальные обоймы небольшой толщины (примерно 3 мм), налегаемые на лобовую часть катушки по всей ее длине и находящиеся в металлическом соприкосновении с бандажами (рис. 5.8). Они выравнивают температуру по длине обмот-

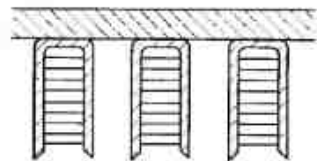


Рис. 5.8. Алюминиевые седла

ки, повышают степень ее надежности и делают ее более устойчивой в отношении механических воздействий.

По обеим сторонам ротора на валу устанавливают вентиляторы (чаще всего пропеллерного типа), обеспечивающие циркуляцию охлаждающего газа в машине.

Массив ротора и металлические клинья, закрывающие обмотку возбуждения в пазах, выполняют в турбогенераторах роль демпферной (успокоительной) системы, улучшающей работу машины в переходных и несимметричных режимах.

Большинство явнополюсных машин (синхронные двигатели, компенсаторы и генераторы, предназначенные для соединения с

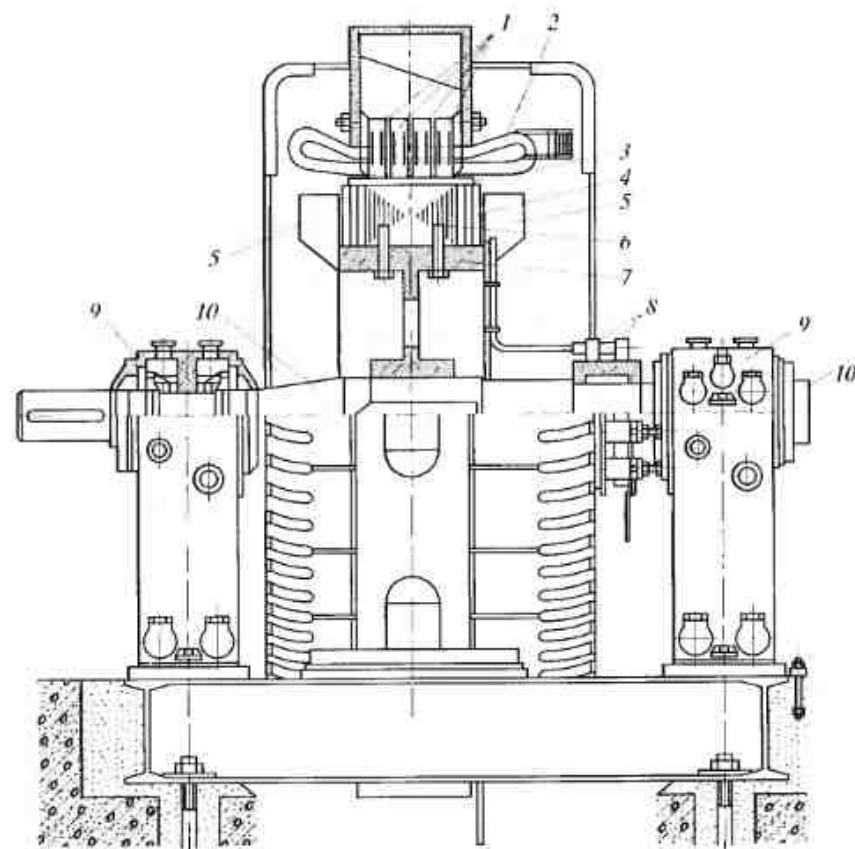


Рис. 5.9. Явнополюсный синхронный генератор с горизонтальным расположением вала:

1 — шакты сердечника статора; 2 — обмотка статора; 3 — успокоительная обмотка; 4 — обмотка возбуждения; 5 — лопасти вентилятора; 6 — сердечник полюса; 7 — обод ротора; 8 — контактные кольца; 9 — подшипник; 10 — вал

двигателями внутреннего статорания, гидрогенераторы с частотой вращения свыше 200 мин^{-1}) выполняют с горизонтальным валом (рис. 5.9). Гидравлические турбины обычно имеют относительно малую частоту вращения ($60 \dots 600 \text{ мин}^{-1}$). Частота вращения тем меньше, чем меньше напор воды и чем больше мощность турбины. Гидрогенераторы являются тихоходными машинами. Они имеют много полюсов, большие размеры и массу. Гидрогенераторы выполняют с явнополюсными роторами и преимущественно с вертикальным расположением вала. Диаметры роторов мощных гидрогенераторов достигают $14 \dots 16 \text{ м}$, а диаметры статоров — $20 \dots 22 \text{ м}$.

В машинах с большим диаметром ротора сердечником служит обод, собираемый на спицах, которые крепятся на втулке ротора. Полюсы, как и обод, изготовляют наборными из стальных листов и монтируют на ободке ротора. В пазах полюсных наконечников размещается демпферная обмотка. Ее изготовляют из медных стержней, закладываемых в пазы и замыкаемых с торцов ротора сегментами. Эта обмотка предназначена для успокоения колебаний ротора агрегата, которые возникают при всяком возмущении, связанном с резким изменением нагрузки генератора.

Радиальный размер воздушного зазора между статором и ротором зависит от мощности синхронной машины и колеблется в пределах от долей сантиметра до нескольких сантиметров.

Статор турбогенератора состоит из корпуса и сердечника. Корпус изготовляют сварным, с торцов он закрыт щитами с уплотнениями в местах стыка с другими частями. Сердечник статора набирают из изолированных листов электротехнической стали толщиной $0,5 \text{ мм}$. Листы образуют пакеты, разделенные между собой вентиляционными каналами.

В турбогенераторах малой мощности сталь статора по всей его окружности выштамповывается из одного листа. Но если внешний диаметр активной стали статора превышает 1 м , то сталь статора штампуются в виде отдельных сегментов, число которых выбирается таким, чтобы отходы стали при раскрое листа были минимальные. Каждый сегмент закрепляется в станине чаще всего посредством «ласточкина хвоста». В открытые пазы, расположенные во внутренней расточке сердечника, укладывается трехфазная обмотка, обычно двухслойная.

В нормальных условиях работы механические напряжения обмотки статора малы. Однако она находится под сравнительно большим напряжением относительно корпуса (обычно $3 \dots 15 \text{ кВ}$), поэтому важными являются вопросы, связанные с ее изоляцией. Чтобы избежать появления вихревых токов в проводниках сплошного сечения, их делят на ряд параллельно соединенных проводников небольшого сечения, спаянных вместе по концам. Для снижения добавочных потерь в меди обмотки статора проводники следует транспонировать, т.е. определенным образом переплести

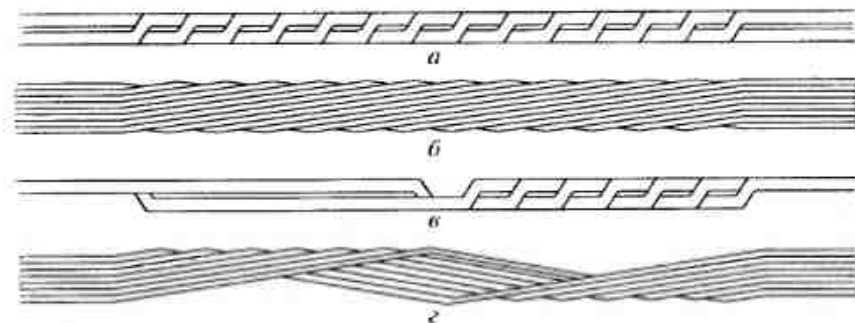


Рис. 5.10. Плетеный стержень:

а, а — схематичное изображение; б, з — способы транспонирования проводников

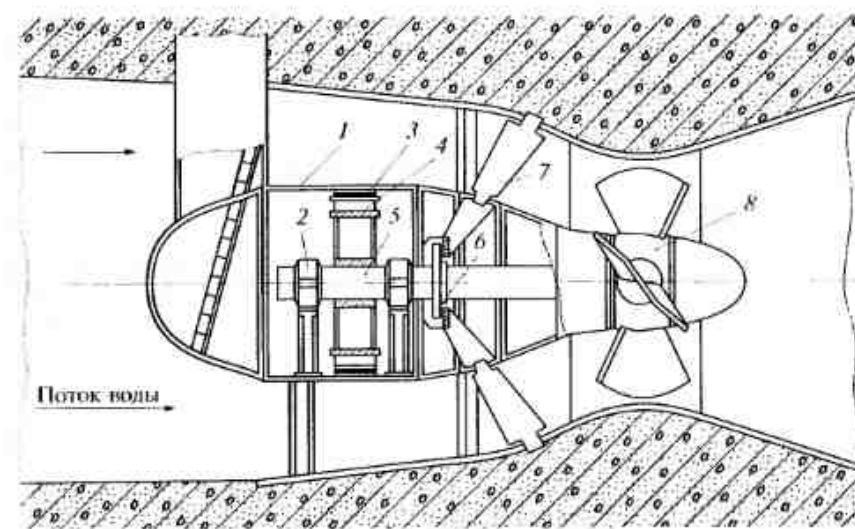


Рис. 5.11. Капсульный синхронный генератор:

1 — водонепроницаемая оболочка; 2 — направляющий подшипник; 3 — статор генератора; 4 — ротор генератора; 5 — вал; 6 — упорный подшипник; 7 — направляющий аппарат турбины; 8 — рабочее колесо турбины

их между собой (рис. 5.10). Лобовые части обмоток переплетать не нужно.

Статор гидрогенератора имеет такую же конструкцию, как и статор турбогенератора, но для облегчения его транспортировки и монтажа выполняется разъемным, состоящим из $2 \dots 6$ равных секторов.

В настоящее время начинают находить применение так называемые *капсульные* (погружные) гидрогенераторы, имеющие гори-

горизонтальный вал (рис. 5.11). Такие генераторы заключаются в водонепроницаемую оболочку (капсулу), которая с внешней стороны обтекается потоком воды, проходящим через турбину. Капсульные генераторы изготовляют на мощность несколько десятков мегавольт-ампер. Это сравнительно тихоходные генераторы ($n = 60 \dots 150$ мин⁻¹) с явнополюсным ротором.

Дизель-генераторы — явнополюсные машины с горизонтальным валом. Они соединены с дизельным двигателем внутреннего сгорания. Дизель как поршневая машина имеет неравномерный крутящий момент, поэтому дизель-генератор снабжается маховиком или его ротор выполняется с повышенным маховым моментом.

Явнополюсные синхронные двигатели и компенсаторы имеют в общем такую же конструкцию, как и явнополюсные генераторы. Отличие состоит лишь в том, что на их роторах кроме обмотки возбуждения установлена также *пусковая обмотка*, отличающаяся от *успокоительной обмотки* генератора тем, что ее стержни выполнены из сплавов с повышенным удельным сопротивлением.

5.4. Возбуждение синхронных генераторов

Обмотки роторов синхронных генераторов питаются от источников постоянного тока, называемых возбудителями. Для возбуждения синхронных генераторов кроме возбудителя требуется дополнительное вспомогательное оборудование. Совокупность возбудителя, вспомогательных и регулирующих устройств называют *системой возбуждения*. Мощность, необходимая для возбуждения синхронного генератора, сравнительно невелика и составляет 0,3...3% мощности синхронной машины, а номинальное напряжение — от 100 до 600...650 В. Чем мощнее генератор, тем обычно больше номинальное напряжение возбуждения. Регулируя ток возбуждения, изменяют напряжение синхронного генератора и отдаваемую им в сеть реактивную мощность. Регулирование возбуждения генератора позволяет повысить устойчивость параллельной работы. Управление током возбуждения исходя из экономической целесообразности осуществляется исключительно за счет изменения напряжения возбудителя.

Для удержания синхронной машины в синхронизме при глубоких снижениях напряжения, которые имеют место, например при коротких замыканиях, применяется форсировка (быстрое увеличение) возбуждения генератора, что способствует прекращению качаний генераторов и сохранению устойчивости параллельной работы. Кроме того, форсировка возбуждения повышает надежность работы релейной защиты и облегчает условия самозапуска двигателей собственных нужд электрических станций. Сле-

дует отметить, что увеличение тока возбуждения должно происходить как можно быстрее, т. е. система возбуждения должна быть быстроотзывчивой.

Согласно стандарту турбогенераторы должны иметь кратность форсировки (отношение наибольшего установившегося номинального напряжения возбудителя, $U_{n, \max}$ к номинальному напряжению возбуждения $U_{n, ном}$) $k_{\Phi} \geq 2$, а номинальную скорость нарастания напряжения возбудителя не менее $2U_{n, ном}$ на контактных кольцах в 1 с. Кратность форсировки для гидрогенераторов должна быть не менее 1,8 — для коллекторных возбудителей, соединенных с валом генератора, и не менее 2 — для других систем возбуждения. Скорость нарастания напряжения возбуждения должна быть не менее $1,3U_{n, ном}$ в 1 с — для гидрогенераторов до 4 МВ·А включительно и не менее $1,5U_{n, ном}$ в 1 с — для гидрогенераторов больших мощностей.

К системам возбуждения для мощных гидрогенераторов, работающих на дальние линии электропередачи, предъявляются более высокие требования ($k_{\Phi} = 3 \dots 4$, скорость нарастания возбуждения до $10U_{n, ном}$ в 1 с).

Различают электромашинные, вентильные, прямые и косвенные системы возбуждения.

В электромашинных системах возбуждения в качестве возбудителя используют генераторы постоянного тока. В прямых системах возбуждения якорь возбудителя сопряжен непосредственно с валом синхронной машины. Эти системы возбуждения обладают более высокой степенью надежности. В косвенных системах возбуждения ротор возбудителя приводится во вращение отдельным двигателем (синхронным или асинхронным), питающимся от шин собственных нужд станции (или от вспомогательного синхронного генератора).

В настоящее время вентильные системы возбуждения (с кремниевыми диодами и тиристорами — управляемыми полупроводниковыми выпрямителями) практически полностью вытеснили электромашинные.

В зависимости от способа питания обмотки возбуждения различают системы независимого возбуждения, самовозбуждения и бесщеточные системы возбуждения.

При независимом возбуждении в качестве источника питания обмотки возбуждения используют возбудитель — генератор постоянного тока (в электромашинных системах возбуждения) или трехфазный генератор переменного тока (в вентильных системах возбуждения). Ротор возбудителя крепится на валу ротора синхронной машины (рис. 5.12, а). Основное достоинство этого способа состоит в том, что возбуждение синхронного генератора не зависит от режима электрической сети и поэтому является наиболее надежным.

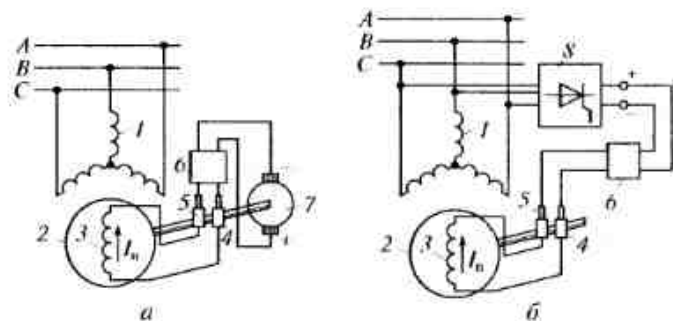


Рис. 5.12. Прямая (а) и косвенная (б) схемы возбуждения синхронной машины:

1 — обмотка якоря; 2 — ротор генератора; 3 — обмотка возбуждения; 4 — кольца; 5 — щетки; 6 — регулятор напряжения; 7 — возбудитель; 8 — выпрямитель.

На генераторах мощностью до 100 МВт включительно, как правило, в качестве возбудителя применяют генераторы постоянного тока с самовозбуждением, соединенные с валом синхронного генератора (рис. 5.13). Обмотка возбуждения возбудителя ОВВ питается от якоря возбудителя. Регулирование возбуждения возбудителя осуществляется вручную шунтовым реостатом ШР, установленным в цепи ОВВ. Возможно регулирование автоматически регулятором возбуждения (на схеме не показано).

Недостатки такой системы возбуждения определяются в основном недостатками возбудителя. Один из них — сравнительно невысокая скорость нарастания возбуждения, особенно у возбудителей гидрогенераторов с низкой частотой вращения. Другой недостаток характерен для турбогенераторов, имеющих большую частоту вращения. Он обусловлен снижением надежности работы генератора постоянного тока вследствие вибрации и тяжелых условий работы щеток и коллектора.

Для турбогенераторов мощностью свыше 165 МВт мощность возбуждения становится настолько значительной, что выполнить надежно работающий генератор постоянного тока на частоту вращения 3000 мин⁻¹ по условиям коммутации становится трудно. Для снижения частоты вращения возбудителя можно выполнить

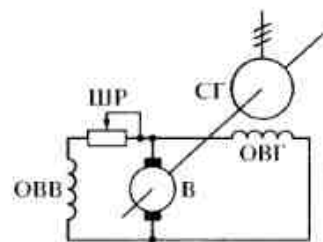


Рис. 5.13. Принципиальная схема независимого электромашинного возбуждения генератора:

ОВВ — обмотка возбуждения возбудителя; ШР — шунтовый реостат; ОВГ — обмотка возбуждения генератора; СГ — синхронный генератор; В — возбудитель.

соединение возбудителя с валом генератора через редуктор. Однако наличие дополнительной механической передачи является недостатком подобной системы.

В мощных генераторах кроме возбудителя обычно применяют подвозбудитель — небольшой генератор постоянного тока, служащий для возбуждения основного возбудителя. Основным возбудителем может служить синхронный генератор совместно с полупроводниковым выпрямителем. Питание обмотки возбуждения через полупроводниковый выпрямитель широко применяют как в двигателях и генераторах небольшой и средней мощности, так и в мощных турбо- и гидрогенераторах (тиристорная (вентильная) система возбуждения). Регулирование тока возбуждения I_n осуществляется автоматически специальными регуляторами возбуждения. В машинах небольшой мощности применяется регулировка и ручную реостатом, включенным в цепь обмотки возбуждения. При необходимости форсировки возбуждения генератора повышают напряжение возбудителя и увеличивают выходное напряжение выпрямителя.

Где требуется большая быстрота отзвучивости при значительном потолке напряжения, в особенности это относится к генераторам, работающим на дальние линии передач, для обеспечения устойчивой работы применяют систему ионного возбуждения.

Система с двухмашинным возбудителем, используемая на Волжской ГЭС, работающей на дальнюю линию передачи протяженностью около 1000 км, состоит в следующем. На валу главного генератора расположен главный возбудитель мощностью 1600 кВт с постоянным напряжением 800 В и частотой 68,2 мин⁻¹. Последовательно с якорем этого возбудителя включен якорь машины добавочного напряжения номинальной мощности 900 кВт с регулировкой напряжения от -800 до +800 В, приводимый во вращение асинхронным двигателем со скоростью 745 мин⁻¹. В номинальном режиме работы генератора машина добавочного напряжения имеет напряжение около -400 В, что обеспечивает напряжение на обмотке возбуждения главного генератора около $800 + (-400) = 400$ В.

При форсировке возбуждения напряжение машины добавочного напряжения изменяется от -400 до +800 В и, следовательно, совместно с главным возбудителем даст $800 + 800 = 1600$ В, т.е. 4-кратное напряжение возбуждения по отношению к номинальному. Чтобы ускорить протекание процесса, в цепь обмотки возбуждения машины добавочного напряжения включают активные сопротивления, рассчитанные так, чтобы постоянная времени форсировочного процесса $T_{ф.н} = L_n / R_n$ не превышала 0,1...0,2 с.

Все рассмотренные выше генераторы имеют контактные кольца на валу ротора и щетки для подвода тока к обмотке возбуждения, что снижает их надежность, особенно при больших токах возбуждения (более 3 кА).

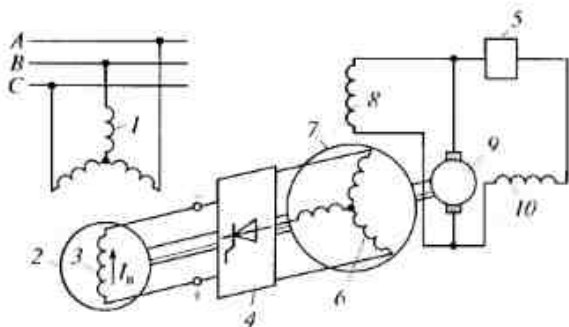


Рис. 5.14. Бесщеточная система возбуждения генератора:

1 — обмотка якоря; 2 — ротор генератора; 3 — обмотка возбуждения; 4 — выпрямитель; 5 — регулятор напряжения; 6 — обмотка якоря возбудителя; 7 — ротор возбудителя; 8 — обмотка возбуждения возбудителя; 9 — полевозбудитель; 10 — обмотка возбуждения полевозбудителя

В современных синхронных генераторах (особенно в турбогенераторах большой мощности) применяют бесщеточную систему возбуждения (рис. 5.14). При этом в качестве возбудителя используют синхронный генератор, у которого обмотка якоря переменного тока расположена на роторе (так называемая обратимая машина), а выпрямитель — непосредственно на валу. Неподвижная обмотка возбуждения возбудителя получает питание от подвозбудителя, снабженного регулятором напряжения. При таком способе возбуждения в цепи питания обмотки возбуждения генератора отсутствуют скользящие контакты, что существенно повышает надежность системы возбуждения.

При самовозбуждении обмотка возбуждения питается через управляемый или неуправляемый (обычно полупроводниковый) выпрямитель (рис. 5.12, б) непосредственно от выводов генерато-

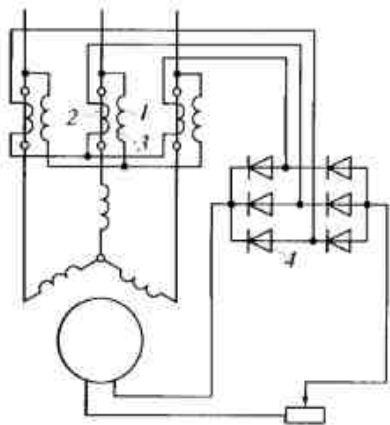


Рис. 5.15. Схема самовозбуждения генератора с трехобмоточным стабилизирующим трансформатором: 1...3 — обмотки; 4 — выпрямитель

ра через специальные понижающие трансформаторы. Здесь же следует рассматривать системы возбуждения с отдельно установленными электромашинными возбудителями, приводимыми во вращение двигателями переменного тока, которые получают питание от шин собственных нужд электрических станций.

Системы самовозбуждения менее надежны, чем системы независимого возбуждения, поскольку в них работа возбудителя зависит от режима сети переменного тока. Короткие замыкания в сети, сопровождающиеся понижением напряжения, нарушают нормальную работу системы возбуждения, которая именно в этих случаях должна обеспечить форсировку тока в обмотке ротора генератора. В связи с этим одновременно с самовозбуждением решается задача поддержания постоянства напряжения генератора при изменении нагрузки. На рис. 5.15 изображена одна из возможных схем самовозбуждения генератора с трехобмоточным стабилизирующим трансформатором.

Обмотка трансформатора 1 присоединяется параллельно нагрузке, обмотка 2 включается последовательно с нагрузкой и в обмотку 3 включается выпрямитель 4. При холостом ходе магнитный поток в трансформаторе создается обмоткой 1 и трансформатор работает как двухобмоточный. При нагрузке генератора ток проходит также и по обмотке 2. Это приводит к повышению магнитного потока трансформатора, вызывает увеличение ЭДС обмотки 3 и соответственно тока возбуждения. В результате получается почти полная компенсация реакции якоря и падения напряжения в генераторе.

Принципиальная схема возбуждения синхронного генератора с электромашинным возбудительным агрегатом показана на рис. 5.16. Возбудительный агрегат состоит из асинхронного двигателя АД, питающегося от шин собственных нужд электростанции,

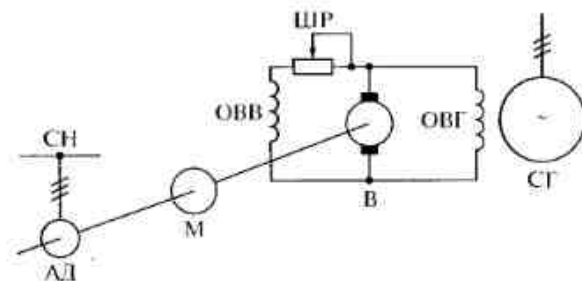


Рис. 5.16. Принципиальная схема независимого электромашинного возбуждения:

АД — асинхронный двигатель; М — маховик; В — возбудитель; ОВВ — обмотка возбуждения возбудителя; СГ — синхронный генератор; ОВГ — обмотка возбуждения генератора; ШР — шунтовый реактор; СН — шины собственных нужд

и генератора постоянного тока В. Для повышения надежности работы возбудительного агрегата при форсировке возбуждения асинхронный двигатель, вращающий возбудитель В, выбирается с необходимой перегрузочной способностью. На валу агрегата располагают маховик М, способствующий сохранению частоты вращения возбудителя при кратковременных снижениях напряжения в питающей сети переменного тока.

Такие возбудительные агрегаты получили широкое распространение на электрических станциях в качестве резервных источников возбуждения.

Гашение поля. В схемах возбуждения предусматривается специальное устройство, с помощью которого в аварийной ситуации можно с достаточной быстротой уменьшить ток возбуждения до нуля (т.е. погасить магнитное поле). При этом соответственно уменьшается ЭДС генератора. Гашение поля может осуществляться и при нормальной эксплуатации, но особое значение оно приобретает при аварийных режимах (например, при внутренних коротких за-

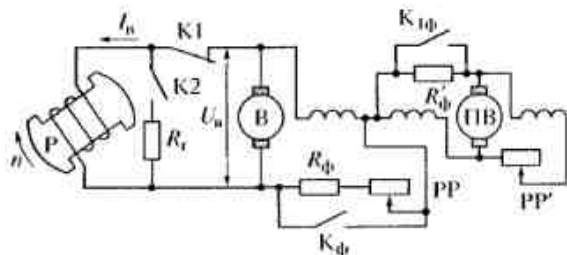


Рис. 5.17. Схема электромашинной системы возбуждения крупной синхронной машины:

Р — ротор машины; В — возбудитель (генератор постоянного тока с параллельно-независимым возбуждением); ПВ — подвозбудитель, генератор постоянного тока с независимым возбуждением; РР и РР' — регулировочные резисторы; К_ф и К_{фб} — контакторы для форсировки возбуждения; R_г и R'_г — резисторы, замыкаемые при форсировке; К1 и К2 — контакты автомата гашения поля (АГП); R_r — гасительный резистор

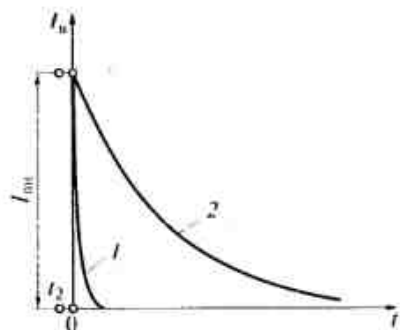


Рис. 5.18. Затухание тока возбуждения при гашении поля:

1 — при прямом включении К1; 2 — при гашении поля с помощью АГП

мыканиях в обмотке статора или на его выводах). Короткие замыкания внутри генератора обычно сопровождаются электрической дугой, вызывающей значительные повреждения обмоток статора и сердечников. Для предотвращения этих повреждений используют специальный коммутационный аппарат: автомат гашения поля (АГП), объединяющий контакторы К1 и К2 и гасительное сопротивление R_г (рис. 5.17). Прямой разрыв цепи возбуждения контактором К1 наиболее быстро привел бы к желаемой цели (кривая 1 на рис. 5.18). Однако в сопротивлении электрической дуги, возникающей между размыкаемыми контактами К1, за время гашения выделяется вся энергия, запасенная в магнитном поле возбуждения. В крупных машинах эта энергия настолько велика, что при прямом разрыве контакты были бы разрушены.

Кроме того, в обмотке возбуждения появляется ЭДС самоиндукции

$$e_n = -L_n \frac{dI_n}{dt},$$

которая вследствие быстрого изменения тока возбуждения (из-за введения в цепь весьма значительного сопротивления дуги) во много раз превосходит номинальное напряжение на обмотке возбуждения и может повредить ее изоляцию.

Отсюда следует, что гашение поля следует выполнять таким образом, чтобы одновременно с отключением возбудителя происходило быстрое поглощение энергии магнитного поля обмотки ротора генератора, так чтобы перенапряжения на ее зажимах не превышали допустимого значения.

В зависимости от мощности генератора и особенностей его системы возбуждения можно использовать различные способы гашения поля: замыкание обмотки ротора на гасительное (активное) сопротивление, включение в цепь обмотки ротора дугогасительной решетки быстродействующего АГП, противовключение возбудителя.

Гашение поля с помощью АГП проводится в следующем порядке. При включенном контакторе К1 включается контактор К2 ($t = t_2$), замыкающий обмотку возбуждения на гасительное сопротивление. Затем ($t = 0$) размыкается контактор К1 и возбудитель отделяется от обмотки возбуждения. Поскольку энергия магнитного поля возбуждения в самой синхронной машине при этом не изменяется, размыкание К1 происходит без нежелательных осложнений. После этого ток возбуждения затухает с постоянной времени $T_{n,г}$.

Гасительное сопротивление подбирают таким образом, чтобы гашение поля происходило достаточно быстро, но без появления недопустимых по условиям электрической прочности изоляции напряжений

$$U_r = R_r I_r = - \frac{L_n dI_n}{dt} - R_n I_n = \frac{U_m R_r}{R_n}$$

Обычно рекомендуемое гасительное сопротивление $R_r = 5R_n$. Постоянная времени гашения поля в крупных машинах $T_r = T_n/6 = 1$ с, где $T_n = L_n/R_n$ — постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутых других обмотках. При этих условиях напряжение на гасительном сопротивлении U_r не превосходит 5-кратного номинального напряжения возбуждения.

Схема, представленная на рис. 5.19, снабжена АГП с решеткой из медных пластин 4, расположенных через 1,5...3 мм. При включенном положении АГП рабочие и дугогасительные контакты замкнуты. При отключении гидрогенератора от сети сначала размыкаются рабочие 1 и затем дугогасительные 2 контакты. Электрическая дуга возникает вначале между дугогасительными контактами. Затем под действием поперечного магнитного поля H , созданного специальными катушками, дуга перемещается в область дугогасительной решетки 3, где она разбивается медными пластинками на ряд последовательно включенных коротких (длиной 2...3 мм) электрических дуг. Чтобы пластины не оплавились, дуга приводится во вращательное движение специально созданным радиальным полем.

Короткая дуга является нелинейным активным сопротивлением, падение напряжения на котором сохраняет практически постоянное значение, равное 25...30 В, несмотря на изменение значения тока в дуге в широких пределах.

Общее падение напряжения на дуге

$$U_d = kU_k,$$

где U_k — напряжение на короткой дуге; k — число последовательных дуговых промежутков в решетке.

Когда дуга втягивается в решетку АГП, напряжение на ней мгновенно возрастает до величины U_d и практически остается неизменным до погасания дуги, т.е. пока имеется запас энергии магнитного поля обмотки возбуждения генератора.

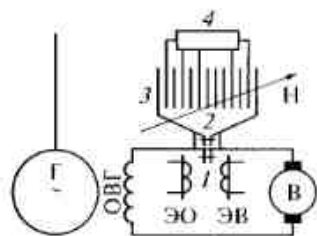


Рис. 5.19. Схема гашения поля автоматом с дугогасительной решеткой:

В — возбуждатель; Г — генератор; ОВГ — обмотка возбуждения генератора; Н — поперечное магнитное поле; ЭВ — электромагнит включения; ЭО — электромагнит отключения; 1 — рабочие контакты; 2 — дугогасительные контакты; 3 — дугогасительная решетка; 4 — набор шунтирующих сопротивлений.

Число пластин в решетке выбирается таким, чтобы U_d превышало U_{nmax} . Время гашения поля с использованием описанной выше схемы составляет 0,5...1 с, т.е. условия гашения поля близки к оптимальным.

При гашении поля, создаваемого небольшим по величине током, дуга в промежутках между пластинами горит неустойчиво, особенно при подходе тока к нулевому значению. Вследствие погасания дуги в одном из промежутков между пластинами обрывается вся цепь тока, что сопровождается перенапряжениями в цепи возбуждения. Для того чтобы подход тока к нулевому значению был плавным, решетка шунтируется специальным набором сопротивлений 4 (см. рис. 5.19). В этом случае дуга гаснет не вся одновременно, а посекционно, и перенапряжения уменьшаются.

Для генераторов с независимым ионным возбуждением обычно используют гашение поля противовключением возбудителя. При этом вентили переводятся в инверторный режим, напряжение на них меняет знак и ток в обмотке ротора быстро спадает до нуля.

Автоматическое регулирование возбуждения (АРВ) генераторов. Простейшим автоматическим устройством, предназначенным для быстрого увеличения возбуждения синхронных генераторов в аварийном режиме, является релейная форсировка возбуждения.

Согласно Правилам технической эксплуатации (ПТЭ) все генераторы независимо от их мощности и напряжения должны иметь устройство релейной форсировки возбуждения, а генераторы мощностью 3 МВт и выше должны также иметь и автоматические регуляторы возбуждения (АРВ) для поддержания напряжения в нормальном режиме. Наиболее распространенными являются устройства компаундирования, основанные на принципе подпитки обмотки возбуждения дополнительным током, пропорциональным току статора генератора, в сочетании с корректором напряжения для обеспечения стабильности напряжения генератора при колебании его на шинах станции.

5.5. Системы охлаждения синхронных генераторов

Во время работы синхронных машин их обмотки и активная сталь нагреваются. Чтобы температура нагрева не превышала допустимых значений, зависящих от класса жаростойкости применяемых изоляционных материалов, все синхронные машины необходимо охлаждать. По способу охлаждения синхронные машины можно классифицировать следующим образом:

- машины с естественным охлаждением, не имеющие специальных приспособлений для охлаждения;

- машины с самовентиляцией, охлаждение нагретых частей которых осуществляется встроенным вентилятором или специальным вентилярующим устройством, составляющим с ротором машины одно целое;

- машины с посторонним (или внешним) охлаждением, в которых охлаждающая среда (обычно газообразная) подается специальным устройством (вентилятором), помещенным вне машины.

По способу отвода теплоты от нагретых обмоток статора и ротора различают две системы охлаждения генераторов — поверхностное (косвенное) и непосредственное (внутреннее) охлаждение.

Для генераторов мощностью до 250 МВ·А рационально применять косвенное охлаждение обмоток. В качестве охлаждающих сред при таком охлаждении почти всегда используют газы, обычно воздух; в быстроходных машинах большой мощности (больше 25 МВт) и в синхронных компенсаторах — водород при атмосферном или избыточном давлении до $5 \cdot 10^5$ Па. В редких случаях внутренняя полость машины с косвенным охлаждением заполняется жидкостью: водой, трансформаторным маслом, керосином.

Только в очень мощных электрических машинах применяется непосредственное охлаждение обмоток. В качестве охлаждающих сред при непосредственном охлаждении используются газы (воздух, водород) или жидкости (вода, трансформаторное масло), циркулирующие по системе внутренних каналов в обмотках.

Во избежание засорения каналов внутри проводников обмоток при непосредственном охлаждении применяются особо чистые жидкости: дистиллированная вода, многократно очищенное от примесей трансформаторное масло.

При поверхностном охлаждении турбогенераторов хладагент (воздух или водород) с помощью вентиляторов, расположенных с торцов ротора, подается внутрь генератора и прогоняется через воздушный зазор и вентиляционные каналы. При этом охлаждающий газ не соприкасается непосредственно с проводниками обмоток статора и ротора и теплота, выделяемая ими, передается охлаждающему газу через изоляцию обмоток и сталь зубцов, т.е. по пути к охлаждаемой поверхности тепловой поток встречает дополнительные тепловые сопротивления.

Отечественные заводы изготавливают турбогенераторы с воздушным, водородным и жидкостным охлаждением, а гидрогенераторы — с воздушным и жидкостным охлаждением.

Существуют две системы воздушного охлаждения: проточная (разомкнутая) и замкнутая.

При проточном охлаждении холодный воздух забирается извне, прогоняется через генератор и затем выбрасывается в машинный зал. Эту систему охлаждения применяют редко и лишь в генераторах небольшой мощности (до 2 МВ·А), так как в этом

случае через генератор прогоняется все время свежий воздух, который загрязняет изоляцию обмоток статора и ротора, что сокращает срок службы генератора.

При замкнутом охлаждении один и тот же воздух циркулирует по замкнутому контуру, что исключает попадание пыли извне в систему вентиляции. Нагретый воздух из генератора поступает в камеру горячего воздуха, проходит через водяной воздухоохладитель и через камеру холодного воздуха вновь возвращается в генератор двумя потоками (сверху и снизу). Такую систему вентиляции называют радиальной.

Для восполнения потерь воздуха в результате утечек в камере холодного воздуха предусмотрен дополнительный забор воздуха через двойные масляные фильтры.

Кроме радиальной системы вентиляции применяют аксиальную и смешанную аксиально-радиальную. При аксиальной системе вентиляции воздух входит в машину с одной стороны (сверху или снизу), проходит между полюсами, через воздушный зазор, аксиальные каналы (при их наличии) сердечника статора и выходит с противоположной стороны.

Смешанная вентиляция применяется в быстроходных машинах с относительно небольшими диаметрами роторов. В такой системе воздух поступает в машину с двух сторон, как и при радиальной вентиляции, а затем направляется вентиляторами в аксиальном направлении вдоль зазора в межполюсное пространство и далее, проходя через радиальные каналы сердечника статора и охлаждая по пути нагретые части, направляется в воздухоохладители.

У генераторов с воздушным охлаждением предусматривается устройство для пожаротушения водой.

Турбогенераторы с замкнутым воздушным охлаждением изготавливают мощностью до 12 МВт включительно.

Генераторы с поверхностным водородным охлаждением имеют такую же систему вентиляции, как и при воздушном охлаждении, но вместо воздуха в генераторе циркулирует водород. Водородное охлаждение значительно эффективнее воздушного и поэтому применяется в настоящее время во всех турбогенераторах мощностью 30 МВт и выше.

Водород как охлаждающий газ по сравнению с воздухом имеет ряд преимуществ. Его теплоемкость в 14,35 раза больше теплоемкости воздуха, что обеспечивает более высокий коэффициент теплопередачи от нагретой поверхности (обмоток и активной стали) к охлаждающему газу. Это свойство водорода позволяет при неизменных размерах турбогенератора увеличить его номинальную мощность в 1,2—1,7 раза при избыточном давлении водорода в генераторе от 0,005 до 0,2 МПа. Значительно меньшая плотность водорода по сравнению с воздухом позволяет уменьшить вентиляционные потери в 8—10 раз. В результате КПД генератора уве-

личивается на 0,8... 1,0 %. Отсутствие окисления изоляции в среде водорода при более высокой чистоте и меньшей влажности (по сравнению с воздушной средой) повышает надежность работы генератора и увеличивает срок службы изоляции обмоток. К достоинствам водорода относится и то, что он не поддерживает горения, поэтому в генераторах с водородным охлаждением можно не устанавливать устройства пожаротушения. Однако водород, заполняющий генератор в смеси с воздухом (от 3,3 до 81,5 %), образует взрывоопасную смесь, поэтому у машин с водородным охлаждением должна быть обеспечена герметичность корпуса статора с помощью масляного уплотнения вала, уплотнения токоподводов к обмоткам статора и ротора, уплотнения крышек газоохладителей и других конструктивных элементов.

5.6. Принцип работы синхронной машины

При вращении ротора с некоторой частотой n поток возбуждения Φ_n , созданный обмоткой возбуждения, индуцирует в проводниках обмотки якоря (статора) переменную ЭДС с частотой $f_1 = pn/60$. Первая гармоническая этой ЭДС

$$E_0 = 4,44 f_1 w_{\phi} k_{\text{об}} \Phi_n. \quad (5.2)$$

Если нагрузка в сети распределена равномерно, то машина генерирует симметричную систему трехфазного тока, причем токи в фазных обмотках сдвинуты относительно ЭДС соответствующих обмоток на некоторый угол ψ , определяемый родом нагрузки. Эта система токов создает вращающееся магнитное поле, частота вращения которого

$$n_1 = 60 f_1 / p. \quad (5.3)$$

а направление вращения совпадает с направлением вращения ротора. Следовательно, это поле неподвижно относительно поля полюсов и вступает с ним в постоянное взаимодействие, на чем и основана работа синхронной машины.

Очевидно, что $n = n_1$. Результирующий магнитный поток синхронной машины создается совместным действием МДС обмотки возбуждения и обмотки якоря, и результирующее магнитное поле вращается в пространстве с той же частотой, что и ротор. Последнее означает, что в установившемся режиме ЭДС в обмотке возбуждения не индуцируется; МДС этой обмотки определяется только током возбуждения и не зависит от режима работы машины. Так машина работает в режиме генератора, преобразуя механическую энергию, подводимую к ней с вала, в электрическую. Как известно, по принципу обратимости машина может работать и в режиме синхронного двигателя, если через щетки и кольца подвести к ней электрическую энергию трехфазного (в общем случае m -фазного) тока.

5.7. Работа синхронного генератора при холостом ходе

При холостом ходе магнитный поток генератора создается только обмоткой возбуждения. Направление этого магнитного потока совпадает с направлением оси полюсов ротора.

Характеристика холостого хода (или соответствующая ей магнитная характеристика) является основной характеристикой любой электрической машины. Из нее исходят при построении всех других характеристик. Она позволяет оценить насыщение магнитной цепи машины. Характеристика холостого хода представляет собой зависимость $E_0 = \varphi(I_0)$ при $f = \text{const}$ ($n = \text{const}$) и $I_1 = 0$. Для регулирования тока возбуждения I_0 используют регулировочный реостат, включенный в цепь возбуждения.

При небольших токах возбуждения магнитный поток мал и стальные участки магнитопровода машины не насыщены и, следовательно, их магнитное сопротивление незначительно. В этом случае магнитный поток практически определяется только магнитным сопротивлением воздушного зазора между ротором и статором, а характеристика холостого хода $E_0 = f(I_0)$, или в другом масштабе $\Phi = f(I_0)$, прямолинейна. По мере возрастания потока увеличивается магнитное сопротивление стальных участков магнитопровода. При индукции в стали свыше 1,7... 1,8 Тл магнитное сопротивление стальных участков сильно возрастает и характеристика холостого хода становится нелинейной (рис. 5.20).

Номинальный режим работы синхронных генераторов находится на переходном «колесе» кривой характеристики холостого хода. Для оценки насыщения магнитной цепи машины достаточно провести касательную Oc в начальной точке O характеристики. Касательная Oc совпадает с прямой частью характеристики, и ее наклон почти целиком зависит от магнитного сопротивления воздушного зазора. Отрезок ac представляет собой МДС воздушного зазора, а отрезок cb равен суммарной МДС стальных частей магнитной цепи машины; при этом коэффициент насыщения $k_{\text{нас}}$, т. е. отношение отрезков ab/ac , составляет 1,1—1,5. Прямая 1 на рис. 5.20 представляет собой спрямленную характеристику холостого хода при отсутствии насыщения, а кривая 2 — при некотором среднем насыщении магнитной цепи машины.

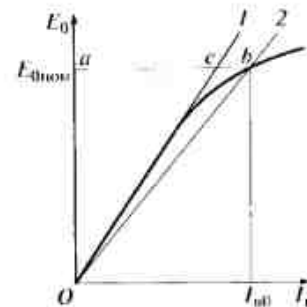


Рис. 5.20. Характеристика холостого хода синхронного генератора:

1 — спрямленная характеристика холостого хода при отсутствии насыщения; 2 — то же, при некотором среднем насыщении

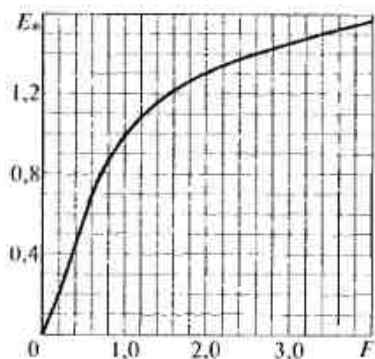


Рис. 5.21. Нормальная характеристика холостого хода синхронной машины:

В современных синхронных машинах характеристики холостого хода имеют относительно стабильный характер. Поэтому в тех случаях, когда точное значение характеристики неизвестно, пользуются усредненной, так называемой *нормальной*, характеристикой холостого хода, представленной на рис. 5.21.

Характеристика построена в системе относительных единиц, широко используемой в теории синхронных машин. В этой системе основные параметры машины (токи, напряжения, мощности, сопротивления) выражают в долях соответствующих базисных величин. За базисные величины обычно принимают номинальные значения соответствующих параметров, которые, очевидно, в этой системе равны единице.

Для обозначения величин в относительных единицах (о.е.) используют те же буквенные символы, отмеченные нижним индексом «н». При этом значения ЭДС и тока возбуждения соответственно равны

$$E_{0n} = E_0/U_{ном}; \quad I_{0n} = I_0/I_{0ном}$$

Ниже приведена нормальная характеристика холостого хода, выраженная в относительных единицах:

E_{0n}	0,58	1,0	1,21	1,33	1,40	1,46	1,51
I_{0n}	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5

Напряжение, индуцированное в обмотке якоря при холостом ходе, должно быть практически синусоидальным, а это означает, что синусоидальным должно быть и распределение магнитного поля. Это достигается для неявнополюсных машин определенным распределением обмотки возбуждения, а для явнополюсных машин — неравномерным воздушным зазором, увеличенным под краями полюсных наконечников. С той же целью обмотку якоря выполняют распределенной с укороченным шагом ($y = 0,8\tau$). Кроме того, для исключения третьих гармониче-

ских токов обмотку якоря трехфазных генераторов соединяют по схеме звезда. При этом отсутствуют третьи гармонические и в линейных напряжениях.

Расчет магнитной цепи синхронных машин подробно приводится в учебной литературе по проектированию электрических машин.

5.8. Реакция якоря синхронной машины при симметричной нагрузке

При нагрузке машины необходимо учитывать совместное действие МДС обеих ее обмоток. Влияние МДС обмотки якоря на распределение индукции в зазоре и величину магнитного потока главных полюсов называется *реакцией якоря*.

Токи трехфазной обмотки статора синхронной машины создают МДС, основная волна которой, называемая МДС реакции якоря, вращается синхронно с ротором. Магнитодвижущая сила реакции якоря воздействует на МДС, созданную обмоткой возбуждения, и может усилить или ослабить поле возбуждения машины, а также исказить его форму.

В синхронном генераторе сдвиг тока статора I_1 относительно ЭДС E_0 , индуцированной в обмотке статора потоком обмотки возбуждения, может находиться в пределах $-\pi/2 \leq \psi \leq \pi/2$, где ψ — угол сдвига во времени между током статора I_1 и ЭДС E_0 , зависящий от рода нагрузки.

Рассмотрим предельные случаи, когда $\psi = 0$, $\psi = \pi/2$, $\psi = -\pi/2$, что в первом случае означает почти активную (с небольшой емкостной составляющей для компенсации внутренней индуктивности машины) нагрузку, во втором случае — чисто индуктивную нагрузку и в третьем случае — чисто емкостную.

На рис. 5.22 представлена картина распределения токов статора и потоков синхронного генератора при $\psi = 0$ (для простоты показана только одна фазная обмотка, состоящая из одной катушки). Вращение полюсов ротора принято по часовой стрелке. Максимум основной волны поля возбуждения будет находиться против середины полюсов. В этих же точках будут расположены проводники с максимальной индуцированной ЭДС; при $\psi = 0$ в этих же проводниках будет и максимум тока. Направление ЭДС определяется по правилу правой руки, причем большой палец должен указывать направление перемещения проводника относительно магнитного поля. Векторы ЭДС и тока показаны на рис. 5.22, в. В рассматриваемый момент времени положение амплитуды МДС всех фазных обмоток совпадает с магнитной осью катушки, изображенной на рис. 5.22, а. Таким образом, магнитные оси якоря (статора) и индуктора (ротора) расположены под углом $\pi/2$ (рис. 5.22, б). Это означает, что поле, создаваемое током якоря, направлено поперек основного

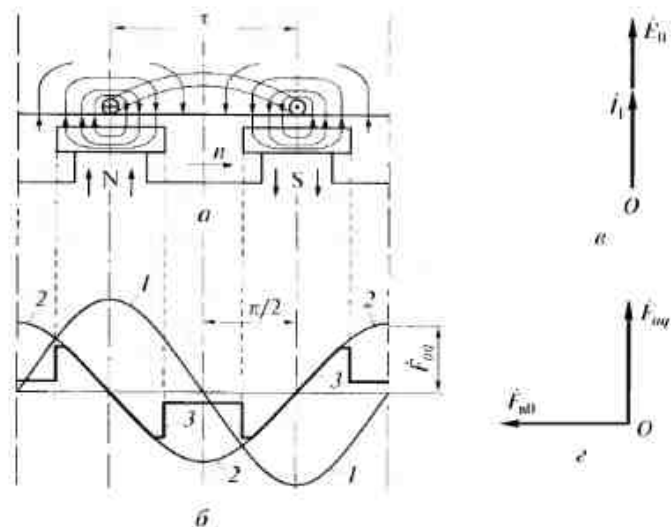


Рис. 5.22. Распределение токов ротора и потоков синхронного генератора при $\varphi = 0$:

a — расположение полюсов; *б* — распределение МДС; *в* — векторная диаграмма тока и ЭДС; *г* — векторная диаграмма МДС; *1* — МДС индуктора; *2* — распределение потока якоря в зазоре неявнополюсного генератора; *3* — распределение потока якоря в зазоре явнополюсного генератора

поля, созданного индуктором. В теории синхронных машин ось, проходящую через середину полюсов, называют продольной и обозначают $d-d$; ось, проходящую через середину междуполюсного пространства, называют поперечной и обозначают $q-q$. В рассматриваемом случае поле якоря ослабляет основное поле под набегающим краем полюса, так как МДС этого поля и МДС поля возбуждения направлены встречно, а под сбегавшим — усиливает его (МДС направлены согласно). Такое поле и соответственно такая реакция якоря называются *поперечными*.

Поскольку учитываются только первые гармонические МДС индуктора и якоря, МДС индуктора представлена на рис. 5.22, *б* синусоидой *1*, а МДС якоря — синусоидой *2*.

Поле якоря зависит от конструктивного исполнения ротора генератора (неявнополюсный или явнополюсный). Для неявнополюсного генератора зазор по окружности статора одинаков, т. е. $\delta = \text{const}$. Если принять магнитную проводимость стали равной бесконечности и учитывать только магнитную проводимость зазора, то можно считать, что кривая *2* соответствует и распределению магнитной индукции якоря в зазоре.

В явнополюсной машине воздушный зазор между статором и ротором увеличивается по направлению к краям полюсов и резко воз-

растает в междуполюсном пространстве. Следовательно, магнитная проводимость между полюсами значительно меньше, чем под полюсами. Поэтому в распределении поля якоря появляются провалы, соответствующие промежуткам между полюсами; магнитная индукция для этого случая показана на рис. 5.22, *б* линией *3*. Сравнение кривых *2* и *3* показывает, что при одной и той же МДС якоря поток якоря Φ_a явнополюсной машины будет меньше, чем поток неявнополюсной машины. Чтобы учесть это уменьшение, явнополюсную машину рассматривают как неявнополюсную с соответственно уменьшенной поперечной магнитодвижущей силой якоря.

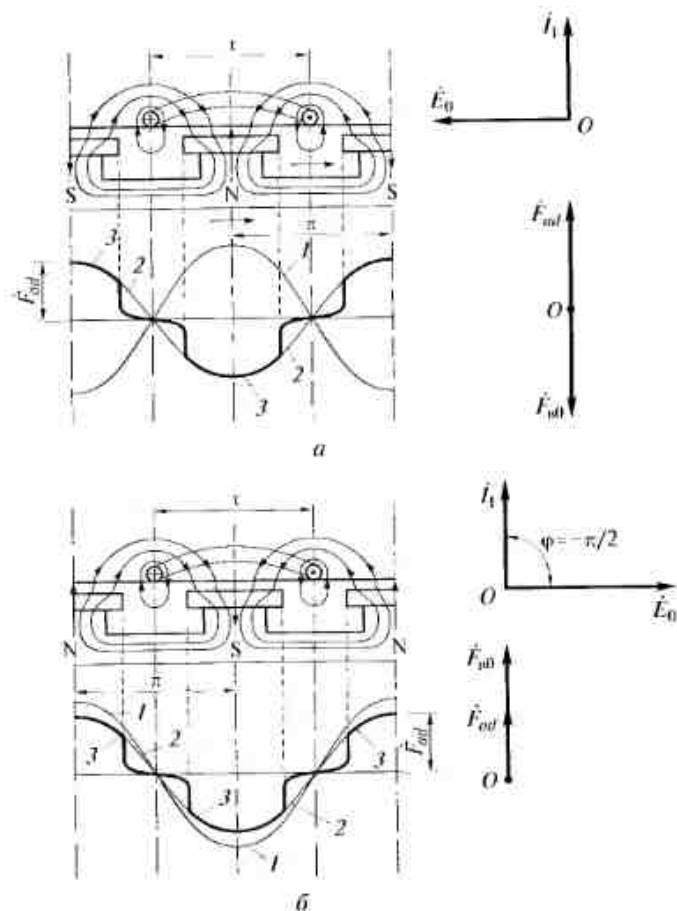


Рис. 5.23. Реакция якоря синхронного генератора:

a — при индуктивной нагрузке; *б* — при емкостной нагрузке; *1* — МДС индуктора; *2* — МДС якоря (распределение поля якоря в неявнополюсной машине; *3* — то же, в явнополюсной машине)

Пусть F_{aq} — амплитуда МДС поперечной реакции якоря неявнополюсной машины (см. рис. 5.22). Тогда уменьшение этой МДС в машине явнополюсного типа учитывается с помощью коэффициента поперечной реакции якоря k_q . Таким образом, в машине явнополюсного типа

$$F_{aq}' = k_q F_{aq} \quad (5.4)$$

Значение коэффициента k_q зависит главным образом от относительной дуги $\alpha' = b_n'/\tau$ (здесь b_n' — ширина полюсного наконечника; τ — полюсное деление). Чем меньше α' , тем больше провалы между полюсами и тем меньше коэффициент k_q . Обычно применяют значения $\alpha' = 0,65 \dots 0,75$. Для них коэффициент $k_q = 0,3 \dots 0,65$.

При чисто индуктивной нагрузке ток i_1 достигает максимума спустя 1/4 периода после достижения максимума ЭДС e_b (рис. 5.23, а), т.е. после поворота ротора относительно положения, показанного на рис. 5.22, а, на 1/2 полюсного деления по направлению его вращения. В этом случае угол между магнитными осями обмотки якоря и полюса индуктора равен π , т.е. ось поля якоря направлена встречно относительно оси поля полюсов. Таким образом, при индуктивной нагрузке реакция якоря синхронного генератора имеет продольно-размагничивающий характер (см. рис. 5.23, а).

Емкостная нагрузка представляет случай, противоположный предыдущему, а поэтому при емкостной нагрузке реакция якоря синхронного генератора имеет продольно-намагничивающий характер (рис. 5.23, б).

На рис. 5.23, б, как и в случае активной нагрузки (см. рис. 5.22, а), МДС полюсов — синусоида 1, МДС якоря — синусоида 2; те же кривые в соответствующем масштабе изображают распределение поля якоря в зазоре неявнополюсной машины. В явнополюсной машине в распределении поля якоря появляются провалы, кривые 3. Причем при индуктивной нагрузке эти провалы гораздо меньше, чем при активной. Как и в предыдущем случае,

$$F_{ad}' = k_d F_{ad} \quad (5.5)$$

где F_{ad}' — амплитуда продольной МДС якоря явнополюсной машины; F_{ad} — то же, неявнополюсной; k_d — коэффициент продольной реакции якоря. Обычно $k_d = 0,8 \dots 0,95$.

При смешанной нагрузке ток i_1 сдвинут по фазе относительно ЭДС e_a на угол ψ , который лежит в диапазоне $+\pi/2 \dots -\pi/2$. На рис. 5.24, б показано расположение векторов тока и ЭДС для активно-индуктивной нагрузки, когда $0 < \psi < \pi/2$. По сравнению с рис. 5.22, а ротор повернется на угол ψ и займет положение, показанное на рис. 5.24, а. Первая гармоническая МДС индуктора показана линией 1 и МДС якоря — линией 2. Угол между маг-

нитной осью обмотки якоря и магнитной осью полюса индуктора составляет $\pi/2 + \psi$ (рис. 5.24, в).

МДС реакции якоря в явнополюсной синхронной машине F_a можно представить двумя составляющими: поперечной реакцией якоря F_{aq} и продольной реакцией якоря F_{ad} (кривые 3 и 4 на рис. 5.24, в) и соответствующими векторами, изображенными на рис. 5.24, г. В этом случае

$$F_{aq} = F_a \cos \psi; \quad (5.6)$$

$$F_{ad} = F_a \sin \psi. \quad (5.7)$$

Соответственно ток в обмотке якоря также может быть представлен двумя составляющими:

$$I_q = I_1 \cos \psi \quad \text{и} \quad I_d = I_1 \sin \psi, \quad (5.8)$$

создающими МДС F_{aq} и F_{ad} .

При приведении явнополюсной машины к неявнополюсной необходимо учитывать уменьшение МДС по формулам (5.4) и (5.5), т.е.

$$F_{aq}' = k_q F_{aq} = k_q F_a \cos \psi; \quad (5.9)$$

$$F_{ad}' = k_d F_{ad} = k_d F_a \sin \psi. \quad (5.10)$$

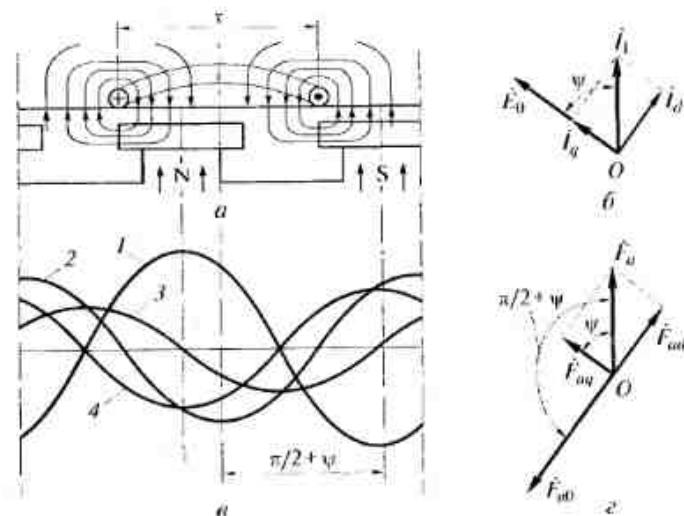


Рис. 5.24. Реакция якоря синхронного генератора при смешанной нагрузке: а — расположение полюсов; б — векторная диаграмма тока и ЭДС; в — распределение МДС; г — векторная диаграмма МДС; 1 — МДС индуктора; 2 — МДС якоря; 3 — МДС поперечной реакции якоря; 4 — МДС продольной реакции якоря

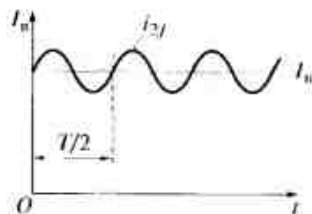


Рис. 5.25. Изменение тока в обмотке возбуждения при наличии обратносинхронного поля

Аналогичную замену МДС F_a двумя составляющими можно произвести и при активно-емкостной нагрузке. В этом случае продольная реакция якоря F_{ad} оказывает продольно-намагничивающее действие.

При однофазном коротком замыкании или несимметричной нагрузке (однофазный режим работы) обмотка якоря трехфазного генератора создает неподвижную в пространстве и пульсирующую во времени МДС. Пульсирующую МДС можно разложить на две МДС половинной амплитуды (см. подразд. 3.3), вращающиеся в противоположные стороны с частотой $n = 60/f_1 p$. МДС, вращающаяся в том же направлении и с той же частотой n , что и ротор, неподвижна относительно него и взаимодействует с его МДС обычным для трехфазных машин образом.

Вторая составляющая вращается относительно ротора с двойной частотой $2n$ и наводит в обмотке ротора и в сердечниках полюсов токи двойной частоты $2f_1$. В обмотке ротора ток двойной частоты i_{2f} налагается на постоянный ток возбуждения I_n (рис. 5.25), в результате чего увеличивается действующее значение тока в обмотке ротора (среднее значение тока в обмотке ротора не изменяется), что вызовет дополнительные потери и, следовательно, дополнительное повышение температуры обмотки ротора. Токи, наводимые в стали ротора, также вызывают дополнительный нагрев. Кроме того, ток i_{2f} может, в свою очередь, создать в обмотке статора высшие гармонические ЭДС и этим исказить форму ЭДС машины. Следовательно, обратно вращающуюся составляющую необходимо по возможности уменьшить. Для этой цели не используют успокоительную обмотку (см. подразд. 5.3).

Вторая составляющая вращается относительно ротора с двойной частотой $2n$ и наводит в обмотке ротора и в сердечниках полюсов токи двойной частоты $2f_1$. В обмотке ротора ток двойной частоты i_{2f} налагается на постоянный ток возбуждения I_n (рис. 5.25), в результате чего увеличивается действующее значение тока в обмотке ротора (среднее значение тока в обмотке ротора не изменяется), что вызовет дополнительные потери и, следовательно, дополнительное повышение температуры обмотки ротора. Токи, наводимые в стали ротора, также вызывают дополнительный нагрев. Кроме того, ток i_{2f} может, в свою очередь, создать в обмотке статора высшие гармонические ЭДС и этим исказить форму ЭДС машины. Следовательно, обратно вращающуюся составляющую необходимо по возможности уменьшить. Для этой цели не используют успокоительную обмотку (см. подразд. 5.3).

5.9. Уравнения напряжений на зажимах синхронного генератора

При работе машины под нагрузкой возникает результирующий магнитный поток, созданный действующими в машине МДС. Для простоты предположим, что все МДС генератора действуют независимо, т.е. каждая МДС создает собственный магнитный поток. В этом случае:

- МДС обмотки возбуждения F_{a0} создает магнитный поток возбуждения Φ_{a0} , который наводит в обмотке статора основную ЭДС генератора E_0 ;

- МДС реакции якоря F_a создает магнитный поток Φ_a , который наводит в обмотке статора ЭДС реакции якоря E_a . В явнополюсной машине МДС реакции якоря по продольной оси F_{ad} создает магнитный поток Φ_{ad} , наводящий в обмотке статора ЭДС E_{ad} , а МДС реакции якоря по поперечной оси F_{aq} создает магнитный поток Φ_{aq} , который наводит в обмотке статора ЭДС E_{aq} . В неявнополюсной машине магнитные сопротивления по продольной и поперечной осям одинаковы, поэтому реакция якоря определяется по полной МДС статора без разделения ее по осям. При этом ЭДС численно равна падению напряжения в индуктивном сопротивлении реакции якоря X_a , называемом главным индуктивным сопротивлением обмотки статора ($E_1 = -jI_1 X_a$);

- магнитный поток рассеяния обмотки статора наводит в обмотке статора ЭДС рассеяния E_{s1} , значение которой пропорционально индуктивному сопротивлению рассеяния фазы обмотки статора X_1 ($E_{s1} = -jI_1 X_1$).

Кроме того, ток в обмотке статора I_1 создает активное падение напряжения ($I_1 R_1$) в активном сопротивлении фазы обмотки статора R_1 .

Напряжение на зажимах генератора, работающего под нагрузкой, отличается от его напряжения в режиме холостого хода. Оно формируется действием результирующего магнитного потока и уменьшается вследствие падения напряжения в активном сопротивлении обмотки статора.

В векторной форме уравнение напряжения для синхронного генератора можно записать в следующем виде:

$$\dot{U} = \sum \dot{E} - I_1 R_1, \quad (5.11)$$

где $\sum \dot{E}$ — геометрическая сумма всех ЭДС, наведенных в обмотке статора результирующим магнитным потоком машины.

Учитывая изложенное, уравнения напряжений на выводах синхронного генератора могут быть записаны следующим образом:

- для неявнополюсной машины

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}_{s1} - I_1 R_1 = \dot{E}_0 - jI_1 X_a - jI_1 X_1 - I_1 R_1,$$

или

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - jI_1 X_c - I_1 R_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_c - I_1 R_1, \quad (5.12)$$

где X_c — синхронное сопротивление, $X_c = X_a + X_1$; \dot{E}_c — синхронная ЭДС неявнополюсной машины;

- для явнополюсной машины

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{s1} - I_1 R_1, \quad (5.13)$$

где X_{ad} и X_{aq} — индуктивные сопротивления обмотки якоря, соответствующие полям продольной и поперечной реакции якоря.

ЭДС \dot{E}_{Σ} можно разложить на две составляющие, одна из них ($\dot{E}_{\Sigma d}$) действует по направлению \dot{E}_0 , а другая ($\dot{E}_{\Sigma q}$) — в перпендикулярном направлении:

$$\dot{E}_{\Sigma d} = -j\dot{I}_d X_1; \quad \dot{E}_{\Sigma q} = -j\dot{I}_q X_1.$$

Тогда уравнение (5.13) принимает вид

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - j\dot{I}_d X_d - j\dot{I}_q X_q - \dot{I}_1 R_1, \quad (5.14)$$

где $X_d = X_{ad} + X_1$ и $X_q = X_{aq} + X_1$ — *полные, или синхронные, индуктивные сопротивления обмотки якоря* соответственно по продольной и поперечной осям.

5.10. Изменение напряжения при нагрузке

При постоянных частоте вращения генератора и токе возбуждения ($n = \text{const}$, $I_n = \text{const}$) изменение напряжения на зажимах генератора (Δu) происходит под влиянием реакции якоря, воздействующей на основной магнитный поток машины, потока рассеяния в ядре и падения напряжения на активном сопротивлении обмотки якоря. Последним обычно пренебрегают.

Номинальным изменением напряжения генератора называется изменение напряжения на зажимах отдельно работающего генератора при изменении нагрузки от номинальной до нулевой (т. е. при переходе к холостому ходу) при неизменных частоте вращения машины и токе возбуждения. Изменение напряжения обычно выражается в процентах:

$$\Delta u_{\text{ном}}\% = \frac{U_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100.$$

Номинальное изменение напряжения определяется техническими условиями, но обычно стремятся к тому, чтобы $\Delta u_{\text{ном}}\%$ было не больше 30...50%. Как правило, генераторы работают с $\cos \varphi = 0,9 \dots 0,85$ (т. е. с индуктивной нагрузкой) и при сбросе нагрузки будет иметь место повышение напряжения, т. е. $\Delta u_{\text{ном}}\%$ будет положительным. Если номинальным условиям соответствовала емкостная нагрузка, то при сбросе будет иметь место понижение напряжения, т. е. $\Delta u_{\text{ном}}\%$ будет отрицательным.

Чтобы подключенные к генератору потребители работали при напряжении, близком к номинальному, применяют специальные устройства (см. подразд. 5.4). Чем больше $\Delta u_{\text{ном}}\%$, тем сложнее регулирующие устройства. Поэтому необходимо уменьшать $\Delta u_{\text{ном}}\%$,

что означает необходимость снижения синхронного индуктивного сопротивления X_s (в неявнополюсных машинах) или соответственно X_d и X_q (в явнополюсных машинах), для чего требуется увеличивать воздушный зазор между ротором и статором. Это, в свою очередь, требует повышения МДС обмотки возбуждения, т. е. ее размеров, что в конечном итоге делает синхронную машину более дорогой по сравнению с асинхронной.

В больших турбогенераторах мощность ограничивается размерами ротора, на котором размещена обмотка возбуждения. Поэтому в современных турбогенераторах с повышением мощности машины одновременно возрастает и изменение напряжения $\Delta u_{\text{ном}}\%$. В гидрогенераторах (по сравнению с турбогенераторами) воздушный зазор обычно имеет гораздо большую величину, поэтому у них слабее проявляется реакция якоря, т. е. они имеют меньшие синхронные индуктивные сопротивления (выраженные в относительных единицах), что обуславливает и меньшее изменение напряжения $\Delta u_{\text{ном}}\%$.

5.11. Характеристика короткого замыкания

Характеристика трехфазного короткого замыкания (рис. 5.26) представляет собой зависимость $I_{k3} = f(I_n)$ при $f_1 = \text{const}$ и $U = 0$. Характеристику можно определить по результатам опыта трехфазного короткого замыкания при замкнутых накоротко выводах синхронного генератора.

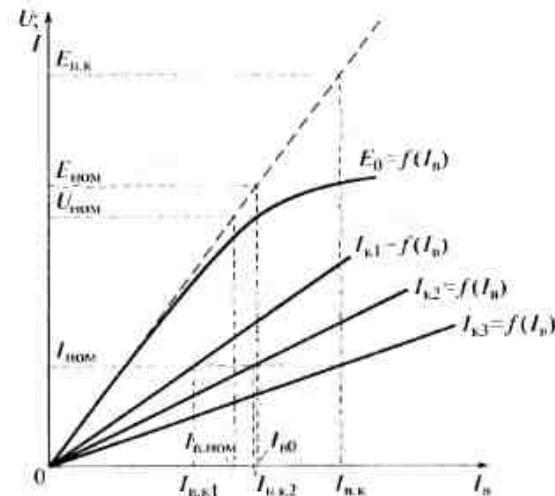


Рис. 5.26. Характеристика короткого замыкания синхронного генератора

Поскольку активное сопротивление обмотки статора мало и им можно пренебречь, то замкнутая накоротко синхронная машина представляет собой практически индуктивное сопротивление. Следовательно, ток короткого замыкания I_k создает только продольно размагничивающую реакцию якоря F_{ad} . Соответствующий ей продольный размагничивающий поток реакции якоря Φ_{ad} создает ЭДС E_{ad} . Кроме того, существуют поток рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и создаваемая им ЭДС рассеяния $E_{\sigma 1}$. Реакция якоря уменьшает результирующий поток машины. Поскольку магнитная система машины оказывается ненасыщенной, а характеристика короткого замыкания носит прямолинейный характер (изгиб появится только при величинах тока, значительно превышающих номинальный).

В режиме короткого замыкания $U = 0$ и уравнения (5.12) и (5.14) для неявнополюсной и явнополюсной машины принимают следующий вид:

$$\dot{E}_0 = j\dot{I}_k X_d + j\dot{I}_k X_l = j\dot{I}_k X_c; \quad (5.15)$$

$$\dot{E}_0 = j\dot{I}_k X_{ad} + j\dot{I}_k X_l = j\dot{I}_k X_d. \quad (5.16)$$

В случае двухфазного и однофазного короткого замыкания характеристики $I_{k2} = f(I_k)$ и $I_{k1} = f(I_k)$ также носят прямолинейный характер, но вследствие уменьшения величины реакции якоря характеристика двухфазного короткого замыкания проходит выше характеристики трехфазного короткого замыкания, а однофазного — выше характеристики двухфазного короткого замыкания.

5.12. Отношение короткого замыкания

Большое значение для оценки свойств синхронной машины имеет отношение тока возбуждения $I_k = I_{k0}$, соответствующего номинальному напряжению $E_0 = U_{ном}$ по характеристике холостого хода, к току возбуждения $I_{kк}$, соответствующего номинальному току $I_{к3} = I_{ном}$ по характеристике трехфазного короткого замыкания (см. рис. 5.26). Указанное соотношение $I_{k0}/I_{kк}$ называется отношением короткого замыкания (ОКЗ). Оно характеризует влияние реакции якоря на обмотку возбуждения синхронной машины. Кроме того, ОКЗ определяет значение установившегося тока короткого замыкания, который возникает при номинальном токе возбуждения генератора (соответствующем номинальному напряжению).

В случае ненасыщенной магнитной системы синхронной машины $ОКЗ = 1/X_d$. При насыщенной магнитной системе для определения ОКЗ это значение следует умножить на отношение величин намагничивающего тока $I_{k0}/I_{к3,ном}$, определяемых по характе-

ристике холостого хода при номинальном напряжении по насыщенной и прямолинейной ее части.

Для синхронных неявнополюсных машин $ОКЗ = 0,5 \dots 1,0$. Для синхронных явнополюсных машин $ОКЗ = 0,8 \dots 1,8$.

Синхронные машины с малой величиной ОКЗ имеют большее изменение напряжения при колебаниях нагрузки, являются менее устойчивыми при параллельной работе и имеют меньшую величину зарядного тока при работе генератора на емкость разомкнутой линии передачи. Однако такая машина является более дешевой.

Чем больше значение ОКЗ, тем выше использование активных материалов в машине. Увеличение размера воздушного зазора приводит к повышению значения ОКЗ и снижению синхронного сопротивления, что улучшает параллельную работу генератора с другими станциями (особенно при наличии длинной линии передачи) и делает работу генератора более устойчивой при колебаниях нагрузки. Однако увеличение воздушного зазора генератора приводит одновременно к повышению его массы и уменьшению использования активных материалов. Это объясняется тем, что изменение зазора меняет магнитное сопротивление машины, что приводит к почти пропорциональному изменению тока возбуждения. Однако, ток возбуждения короткого замыкания меняется мало, так как МДС возбуждения, преодолевающая магнитное сопротивление зазора, составляет относительно небольшую часть от общей МДС обмотки возбуждения в режиме короткого замыкания, в основном компенсирующей МДС реакции якоря.

5.13. Внешние, регулировочные и нагрузочные характеристики синхронного генератора

Зависимость напряжения U от тока нагрузки I_1 при неизменных токе возбуждения I_k , угле нагрузки φ и постоянной частоте вращения ротора n называют *внешними характеристиками генератора*.

На рис. 5.27, а изображены внешние характеристики генератора при различных видах нагрузки, полученные при одинаковом для всех характеристик значении $U_{ном}$, а на рис. 5.27, б — при одинаковом значении $U_0 = E_0$.

При индуктивной нагрузке $0 < \varphi < \pi/2$ реакция якоря и падение напряжения $jI_1 X_l + I_1 R_l$ вызывают уменьшение напряжения, поэтому внешняя характеристика имеет резко падающий характер (см. рис. 5.27), причем с уменьшением $\cos \varphi$ возрастает падение напряжения.

При емкостной нагрузке (опережающем $\cos \varphi$), что соответствует $0 > \varphi > \pi/2$, указанные факторы повышают напряжение, поэтому с уменьшением $\cos \varphi$ напряжение возрастает быстрее.

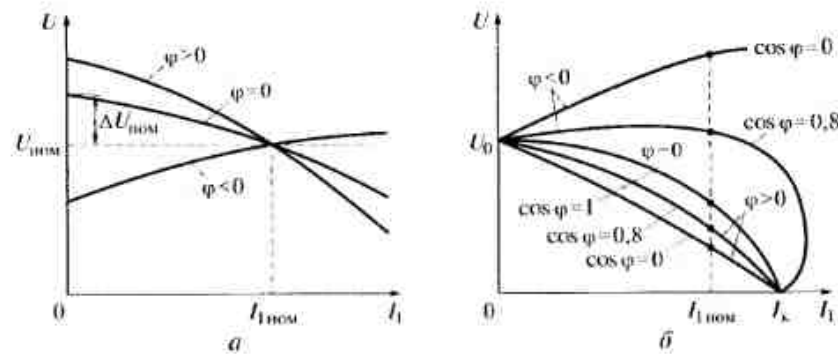


Рис. 5.27. Внешние характеристики синхронного генератора при различных видах нагрузки:
 а — при одинаковом $U_{ном}$; б — при одинаковом U_0

При $U = 0$ (короткое замыкание) все характеристики пересекаются в одной точке, соответствующей значению тока трехфазного короткого замыкания.

В неявнополюсных синхронных генераторах относительная величина реакции якоря обычно больше, чем в явнополюсных, поэтому относительное падение напряжения при индуктивной нагрузке больше, чем повышение напряжения при емкостной нагрузке.

Регулировочные характеристики представляют собой зависимость тока возбуждения I_n от тока нагрузки I_1 при неизменных напряжении U , угле φ и частоте вращения ротора n . Из анализа внешних

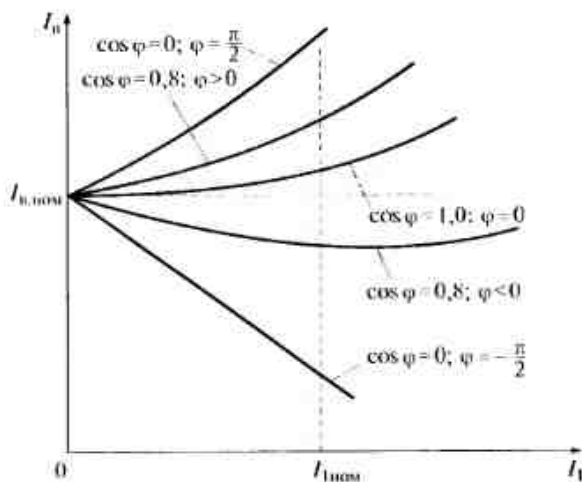


Рис. 5.28. Регулировочные характеристики синхронного генератора

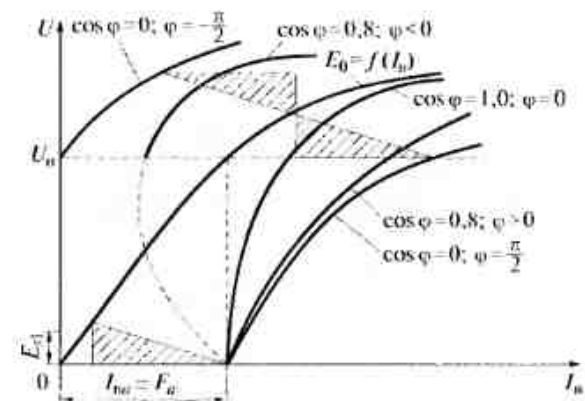


Рис. 5.29. Нагрузочные характеристики синхронного генератора

характеристик следует, что для поддержания напряжения $U = \text{const}$ при росте индуктивной нагрузки необходимо увеличение тока возбуждения, а при возрастании емкостной нагрузки — уменьшение возбуждения. При уменьшении $\cos \varphi$ требуется соответственно большее изменение тока возбуждения, что видно из регулировочных характеристик для различных значений $\cos \varphi = \text{const}$ (рис. 5.28).

Нагрузочные характеристики — зависимость $U = f(I_1)$ при неизменном токе нагрузки I_1 , угле сдвига фаз φ и частоте вращения ротора n . Характеристику холостого хода $E_0 = f(I_n)$ можно рассматривать как частный случай нагрузочной характеристики при $I_1 = 0$.

Наибольшее практическое значение имеет так называемая индукционная нагрузочная характеристика при $\cos \varphi = 0$ и $\varphi = \pi/2$ (отстающем), которая представлена на рис. 5.29, так как она дает возможность определять индуктивное сопротивление X_l . Нагрузочные характеристики при $\cos \varphi = 0,8$ ($\varphi > 0$) и $\cos \varphi = 1$ проходят выше индукционной характеристики $\cos \varphi = 0$ и не параллельны характеристике холостого хода $E_0 = f(I_n)$. При опережающем токе ($\varphi < 0$) нагрузочные характеристики для $\cos \varphi = 0,8$ и $\cos \varphi = 0$ проходят выше характеристики холостого хода.

5.14. Потери и КПД синхронного генератора

Потери, возникающие в синхронной машине, можно разделить на основные и добавочные. Основные потери появляются в результате проявления определяющих электромагнитных и механических процессов работы машины. К ним относят электрические потери в обмотках якоря и возбуждения, магнитные потери в сердечнике статора и механические потери (на трение в под-

шипниках и щетках контактных колец и вентиляционные потери).

К добавочным относятся потери, которые возникают в результате проявления вторичных процессов электромагнитного характера. Некоторые из них возникают при холостом ходе машины (добавочные потери холостого хода), другие — при нагрузке (добавочные потери короткого замыкания). Причинами возникновения добавочных потерь являются потоки рассеяния статора, высшие гармонические МДС статора и ротора и наличие зубцов и пазов на статоре и роторе.

Потоки рассеяния статора создают добавочные потери в пазовой и лобовой частях обмотки статора, а также во всех металлических частях, куда проникает поток рассеяния, — в щитах, нажимных плитах, бандажах и т.п.

Высшие гармонические МДС создают добавочные потери на поверхности статора и ротора, перемещаясь относительно них с разными скоростями. Поскольку эти гармонические не проникают глубоко в металлические части вследствие экранирующего действия вихревых токов, то эти потери называют поверхностными.

Зубцовые гармонические магнитного поля вызывают поверхностные потери (на поверхности статора и ротора) вследствие поперечных колебаний потока и пульсационные потери вследствие продольных колебаний потока в зубце. Пульсационные потери по сравнению с поверхностными обычно невелики.

Для уменьшения добавочных потерь обмотку статора выполняют с укорочением шага, проводники обмотки статора делят по высоте паза на ряд элементарных проводников и выполняют их транспозицию в активной, а иногда и в лобовой части обмотки. Нажимные плиты, бандажи и другие элементы выполняют из немагнитной стали; в турбогенераторах используют рифление ротора.

Коэффициент полезного действия синхронного генератора вычисляют по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1 - \sum P}{P_2 + \sum P},$$

где P_2 — полезная (активная) мощность; $\sum P$ — сумма всех потерь.

Активная мощность, отдаваемая трехфазным генератором ($m = 3$), равна

$$P_2 = mUI_1 \cos \varphi, \quad (5.17)$$

где U и I_1 — фазное напряжение и ток; φ — угол сдвига фаз между током I_1 и напряжением U .

На рис. 5.30 показана энергетическая диаграмма синхронного генератора. Приводной двигатель, вращающий синхронный генератор, подводит к нему мощность P_1 . Часть этой мощности тратится на покрытие механических потерь $P_{мк}$, потерь в стали статора P_c и потерь на возбуждение P_n (если возбуждатель находится на одном валу с генератором). Оставшаяся часть мощности $P_{мг}$, называемая электромагнитной, передается на статор электромагнитным путем в результате взаимодействия между основным потоком и токами в статоре. Полезная мощность генератора P_2 меньше $P_{мг}$ на величину потерь в обмотке статора $P_{вт}$, т.е. $P_2 = P_{мг} - P_{вт}$. Однако даже в машинах средней мощности $P_{вт} < 1\%$ номинальной мощности. На этом основании потерями $P_{вт}$ можно пренебречь и считать, что $P_{мг} = P_2$; тогда по формуле (5.17)

$$P_{мг} = mUI_1 \cos \varphi. \quad (5.18)$$

Рассмотрим векторную диаграмму ЭДС явнополюсного синхронного генератора (рис. 5.31), построенную в соответствии с выражением (5.14), активным падением напряжения вследствие малости его значения пренебрежем.

На рис. 5.31 $\varphi = \psi - \theta$, где ψ — угол сдвига между ЭДС \dot{E}_0 и током \dot{I}_1 , θ — угол сдвига между ЭДС \dot{E}_0 и напряжением \dot{U} .

Подставив значение φ в (5.18), получим

$$P_{мг} = mUI_1 \cos(\psi - \theta) = mUI_1 \cos \psi \cos \theta + mUI_1 \sin \psi \sin \theta. \quad (5.19)$$

Из диаграммы ЭДС и с учетом (5.8) следует, что

$$U \cos \theta = OB = E_0 - I_d X_d = E_0 - I_1 X_d \sin \psi,$$

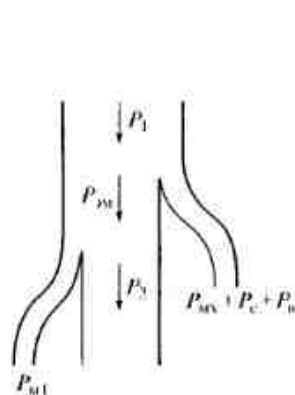


Рис. 5.30. Энергетическая диаграмма синхронного генератора

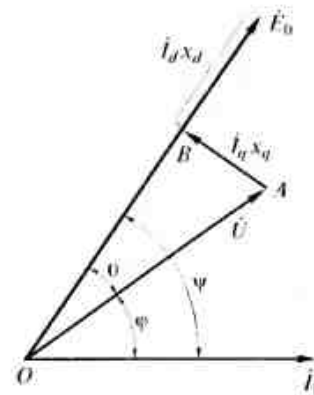


Рис. 5.31. Диаграмма ЭДС явнополюсного синхронного генератора

отсюда

$$I_1 \sin \psi = \frac{E_0 - U \cos \theta}{X_d}$$

С другой стороны,

$$U \sin \theta = AB = I_1 X_q \cos \psi,$$

отсюда

$$I_1 \cos \psi = \frac{U \sin \theta}{X_q}$$

Подставляя значения $I_1 \sin \psi$ и $I_1 \cos \psi$ в формулу (5.19) и учитывая, что $\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta$, после преобразований получаем

$$P_m = \frac{mE_0U}{X_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta, \quad (5.20)$$

или

$$P_m = \frac{mE_0U}{X_c} \sin \theta. \quad (5.21)$$

для неявнополюсной синхронной машины, так как $X_q = X_d = X_c$.

5.15. Параллельная работа синхронных машин

На современных электрических станциях для работы на общую электрическую сеть устанавливают несколько генераторов, включаемых параллельно. Это позволяет увеличить общую мощность электростанции при ограниченной мощности каждого из генераторов. Кроме того, график нагрузки станции колеблется как в различные времена года, так и в течение суток, и тогда при малой нагрузке ряд генераторов может быть выключен, а оставшиеся будут работать с большим использованием, что улучшает КПД генераторов и приводных двигателей. Параллельная работа нескольких синхронных генераторов позволяет лучше организовать обслуживание агрегатов, а при аварии с одним генератором станции потеряет лишь часть своей мощности.

В крупных промышленных центрах на параллельную работу включается ряд станций, что позволяет иметь меньшую резервную мощность и более выгодно использовать установленную мощность. Таким образом, можно считать, что синхронный генератор, установленный на станции (или ином объекте, подключенном к энергосистеме), работает параллельно с сетью бесконечно большой мощности (по сравнению с мощностью самого генератора). Это означает, что напряжение сети U_c и ее частота f_c не зависят от нагрузки данного генератора.

Для безаварийного включения генераторов на параллельную работу необходимо обеспечить минимальный бросок тока в момент присоединения генератора к сети, иначе возможно срабатывание защиты, отказ генератора или приводного двигателя. Для этого ток в момент подключения генератора к сети должен быть равен нулю. Это возможно, если удастся обеспечить равенство мгновенных значений напряжений сети u_c и генератора u :

$$U_{cm} \sin(\omega_c t - \alpha_c) = U_m \sin(\omega_1 t - \alpha_1). \quad (5.22)$$

Выполнение равенства (5.22) сводится к выполнению трех условий: равенство значений напряжений сети и генератора $U_c = U$; равенство частот $\omega_c = \omega_1$ (т.е. $f_c = f_1$); равенство начальных фаз $\alpha_c = \alpha_1$ (совпадение по фазе векторов U_c и U). Кроме того, для трехфазных генераторов нужно согласовать порядок чередования фаз. Поскольку по выводным концам генератора нельзя судить о порядке следования фаз, то его надо проверить перед включением генератора на шины. Для проверки правильности включения применяют фазные лампы, включаемые во все три фазы генератора.

Параллельно работающие генераторы связаны друг с другом электрически (или через трансформаторы), и, следовательно, их напряжения изменяются с одной и той же частотой f_c . При этом электрические угловые частоты их роторов также одинаковы и равны $\omega_c = 2\pi f_c$. Поэтому говорят, что параллельно включенные генераторы работают синхронно: вышеназванные условия называют *условиями синхронизации*, совокупность операций, обеспечивающих их выполнение, называют *синхронизацией*.

На практике при синхронизации генератора сначала устанавливают номинальную частоту вращения ротора, что обеспечивает

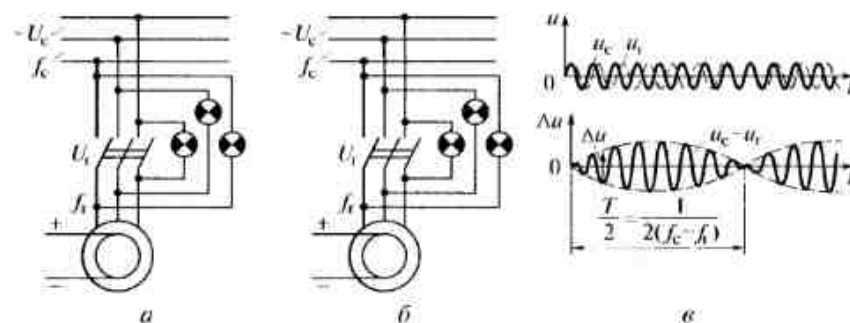


Рис. 5.32. Схемы подключения синхронного генератора к сети с помощью лампового синхроскопа:

a — схема на потасание света; *b* — схема на вращение света; *в* — кривые изменения напряжений сети (u_c) и генератора (u_1) перед включением генератора по схеме *a*

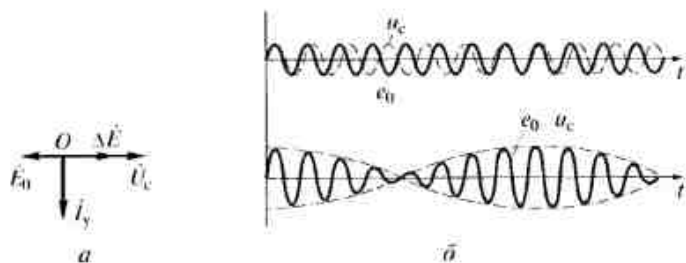


Рис. 5.33. Нарушение условия синхронизации $U_c = E_0$:
 а — возникновение уравнительного тока; б — биение напряжений

приближенное равенство частот $f_c = f_1$. Затем добиваются равенства напряжений $U_c = U$, регулируя ток возбуждения.

Существует два способа подключения синхронных генераторов к сети: *точной синхронизации* и *самосинхронизации*.

Способ точной синхронизации предполагает использование специальных приборов — ламповых или стрелочных синхроскопов, контролирующих совпадение по фазе векторов напряжений сети и генератора.

Ламповый синхроскоп представляет собой три лампы, включенные между соответствующими фазами генератора и сети. При этом различают две схемы включения: *схему на погашение* (рис. 5.32, а) и *схему на вращение света* (рис. 5.32, б). На каждую лампу действует напряжение $\Delta u = u_c - u_1$, которое при $f_c \neq f_1$ изменяется с частотой $\Delta f = f_c - f_1$. В этом случае лампы мигают. При $f_c = f_1$ разность Δu изменяется медленно и лампы постепенно загораются и погасают.

Обычно генератор подключают к сети в тот момент, когда разность напряжений $\Delta u = 0$ (рис. 5.32, в). Для более точного определения момента включения часто применяют нулевой вольтметр, имеющий растянутую шкалу в зоне нуля.

При наличии трехфазных синхронных машин высокого напряжения лампы включаются через измерительные трансформаторы напряжения. Необходимо лишь убедиться, что трансформаторы принадлежат к одной и той же группе.

В стрелочных синхроскопах при $f_c \neq f_1$ стрелка вращается с частотой, пропорциональной $\Delta f = f_c - f_1$. Направление вращения определяется большей частотой. При равенстве частот сети и генератора стрелка устанавливается на нуль, в этот момент и следует подключать генератор к сети.

Посмотрим, что произойдет, если одно из условий синхронизации не выполнено. Пусть частота подключаемого к сети генератора f_1 равна f_c — частоте сети, а $E_0 \neq U_c$, например $U_c > E_0$. В этом случае в замкнутом контуре генератор—система появится результирующая ЭДС $\Delta E = U_c - E_0$ (рис. 5.33, а). Вектор этой ЭДС направ-

лен в сторону вектора U_c . Под ее воздействием в обмотке статора генератора появится уравнительный ток I_y . Если пренебречь активным сопротивлением обмотки статора, то

$$I_y = \Delta E / \sum X_c, \quad (5.23)$$

где $\sum X_c$ — сумма синхронных индуктивных сопротивлений параллельно работающих генераторов. По фазе вектор тока отстает от результирующей ЭДС ΔE на $\pi/2$; стало быть, он отстает на $\pi/2$ от U_c и опережает на $\pi/2$ ЭДС E_0 . Таким образом, ток I_y является по отношению к сети практически индуктивным. По отношению к генератору, имеющему меньшую ЭДС, ток I_y — емкостный и, создавая продольную намагничивающую реакцию якоря, стремится увеличить эту ЭДС.

Уравнительный ток — реактивный, и он не нагружает приводные двигатели. Поскольку индуктивное сопротивление синхронных генераторов относительно велико, то даже при большой разности ΔE уравнительный ток I_y не превышает номинальный. В момент включения в сеть возможен бросок тока, создающий на валу генератора механические усилия, чтобы они были невелики и не представляли опасности для машины, разность напряжений ΔE не должна превышать 5...10% номинального.

Если $U_c = E_0$, а $f_1 \neq f_c$, то возникнут биения напряжения, т.е. сумма напряжений сети u и ЭДС e подключаемого генератора будет изменяться в пределах от 0 до $2U_c$ (рис. 5.33, б). Биение происходит тем медленнее, чем ближе между собой частоты f_1 и f_c . Такого рода биения напряжения вызывают соответствующие биения тока, в результате чего возможны сильные механические толчки.

Пусть в некоторый момент времени векторы U_c и E_0 расположились так, как показано на рис. 5.34. Их геометрическая сумма дает результирующую ЭДС ΔE , под влиянием которой потечет некоторый ток биений I_b , отстающий от ΔE по фазе почти на $\pi/2$. Основная разница между уравнительным током I_y и током I_b состоит в том, что, как это видно по диаграмме (см. рис. 5.34), ток I_b почти совпадает по фазе с ЭДС E_0 и находится в противофазе с напряжением U_c . Таким образом, ток I_b в рассматриваемый момент времени является практически активным током, который не только нагружает генераторы, но и отражается на работе приводных двигателей. В худшем случае может получиться, что не только рассматриваемый генератор не войдет в синхронизм, но могут выпасть из синхронизма и другие параллельно работающие генераторы. Это обуславливает ограничение в 0,1% на допустимую разность частот при включении.

Если перед включением генератора ток возбуждения генератора и угловая частота подобраны так, что $U_c = E_0$, $f_c = f_1$, то при изменении угла α (между ЭДС генератора и напряжением сети)

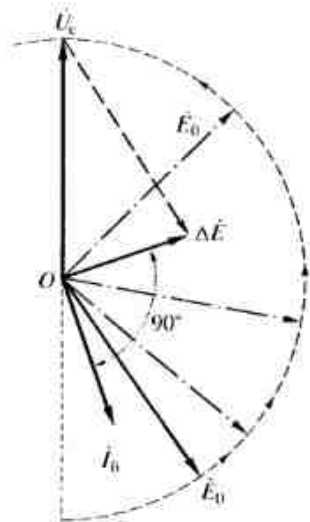


Рис. 5.34. Нарушение условия синхронизации $f_g \neq f_c$

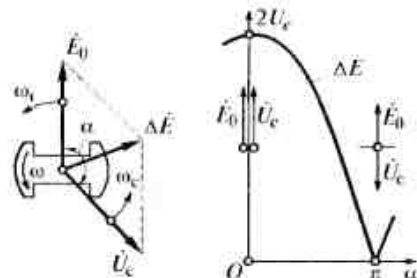


Рис. 5.35. Нарушение условия синхронизации $\alpha_c = \alpha_g$

результатирующая ЭДС в контуре генератор—сеть может принимать любые значения от 0 до $2U_c$ (рис. 5.35):

$$\Delta E = 2U_c |\cos(\alpha/2)|.$$

Наиболее благоприятны для подключения генератора к сети являются условия, когда $\alpha = \pi$. В этом случае $\Delta E = 0$.

Если $\alpha \neq \pi$ в обмотке якоря установится ток I (рис. 5.36), который можно определить по выражению (5.23). Ток I ограничивается индуктивным сопротивлением X_1 обмотки якоря и отстает от результирующей ЭДС ΔE , действующей в контуре генератор—сеть, на угол $\pi/2$. Индуцируемая этим током ЭДС ($-jIX_1$) изменяет напряжение на выводах генератора: вместо напряжения \dot{E}_0 появляется напряжение

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - jIX_1 = -\dot{U}_c,$$

которое в контуре генератор—сеть находится в противофазе с напряжением сети. Следует отметить, что по отношению к внешней нагрузке напряжения U и U_c совпадают по фазе.

Таким образом, появление тока I уравнивает напряжения генератора и системы ($U = -U_c$) и делает напряжение генератора направленным в противоположную сторону по отношению к напряжению системы.

Точная синхронизация бывает ручная и автоматическая. При ручной синхронизации все операции производятся оперативным

персоналом вручную. Для исключения неправильных действий персонала в схему синхронизации вводится специальная блокировка, которая автоматически препятствует прохождению сигнала на включение выключателя, если он был подан в неблагоприятный момент.

Автоматическая синхронизация выполняется с помощью специальных устройств — автоматических синхронизаторов, которые позволяют осуществлять включение генератора в сеть без участия обслуживающего персонала.

Недостатками способа точной синхронизации являются: сложность и длительность процесса, особенно в условиях аварийного режима работы энергосистемы, сопровождающегося колебаниями частоты и напряжения; необходимость высокой квалификации обслуживающего персонала; возможность тяжелых аварий при нарушении условий синхронизации.

В настоящее время в энергосистемах применяется включение синхронных генераторов в сеть по методу самосинхронизации. При самосинхронизации ротор генератора приводится во вращение приводным двигателем с частотой, которая может отличаться от синхронной на $\pm(2...3)\%$. Затем генератор включается в сеть без возбуждения. Сразу же после включения генератора в сеть на обмотку возбуждения подается напряжение и генератор втягивается в синхронизм. В момент включения в сеть невозбужденного генератора обмотка статора потребляет из сети значительный реактивный ток, который не создает дополнительных механических нагрузок на валу генератора. Однако вращающееся магнитное поле, созданное

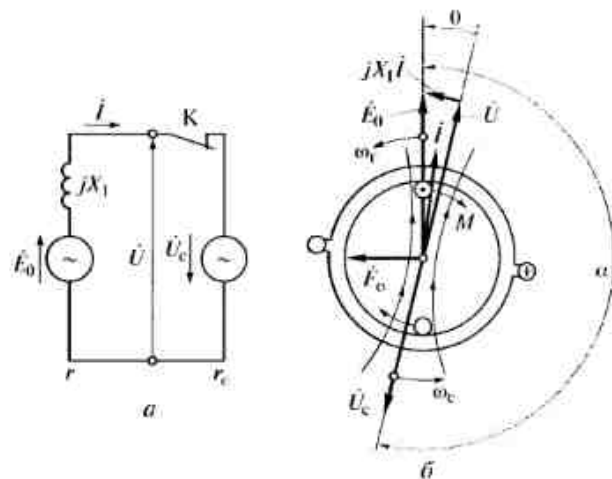


Рис. 5.36. Возникновение синхронизирующего момента:

a — упрощенная схема генератор—сеть; b — векторная диаграмма синхронного генератора при $\alpha \neq \pi$

этим током, индуцирует большую ЭДС в обмотке ротора генератора, способную повредить изоляцию. Поэтому включение статора генератора при самосинхронизации на сеть при разомкнутой цепи возбуждения недопустимо. Обмотка ротора, во избежание перенапряжений в момент включения, замыкается накоротко или через небольшое сопротивление. В качестве сопротивления в цепи возбуждения используют сопротивление гашения поля.

Таким образом, при включении генератора по методу самосинхронизации результирующая ЭДС равна напряжению сети ($E_s = U_c$), а ротор генератора вращается с частотой, несколько отличающейся от синхронной частоты, с которой вращается магнитное поле статора. При этом в статоре наблюдается бросок тока, в несколько раз превышающий номинальный ток, но возникающие механические усилия на валу генератора невелики и не представляют опасности для машины. Бросок тока не должен превышать значения $3,5I_n$.

Метод самосинхронизации значительно упрощает процесс включения, требует мало времени и может быть легко автоматизирован. Он имеет особенно большое значение при ликвидации аварий, когда, с одной стороны, генератор нужно быстро включить в сеть, а с другой стороны, при значительных колебаниях напряжения и частоты работа описанных синхронизационных устройств затрудняется, а иногда просто невозможна.

5.16. Регулирование активной и реактивной мощности синхронного генератора

Регулирование активной мощности. После включения генератора в сеть его напряжение U равно напряжению сети U_c . Относительно внешней нагрузки напряжения \dot{U} и \dot{U}_c совпадают по фазе, а по контуру генератор—сеть находятся в противофазе, т.е. $\dot{U} = -\dot{U}_c$ (рис. 5.37, а). При точном выполнении указанных трех условий, необходимых для синхронизации генератора, его ток I_1 после подключения машины к сети равняется нулю, т.е. $\dot{U} = \dot{E}_0$.

Рассмотрим, какими способами можно регулировать ток I_1 при работе генератора параллельно с сетью на примере неявнополюсного генератора. Ток, проходящий по обмотке якоря неявнополюсного генератора, можно определить из уравнения (5.12), пренебрегая падением напряжения в малом активном сопротивлении фазы якоря,

$$I_1 = \frac{\dot{E}_0 - \dot{U}}{jX_c} = \frac{j(\dot{E}_0 - \dot{U})}{X_c}. \quad (5.24)$$

Поскольку $U = U_c = \text{const}$, то ток I_1 можно изменять только двумя способами — изменяя ЭДС E_0 по величине или по фазе.

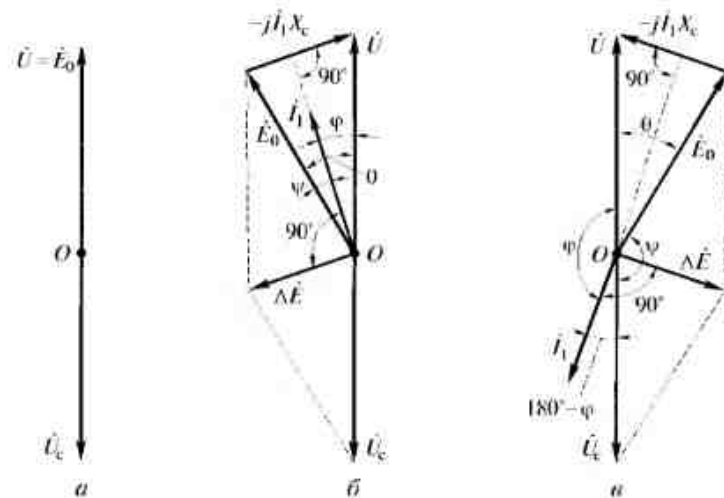


Рис. 5.37. Регулирование активной мощности:

а — векторная диаграмма синхронного генератора при работе без нагрузки; б и а — то же, при ускорении и торможении ротора соответственно

Если к валу генератора приложить внешний момент, превышающий момент, необходимый для компенсации магнитных потерь мощности в стали и механических потерь, то ротор приобретает ускорение (т.е. $\omega > \omega_c$), вследствие чего вектор \dot{E}_0 в комплексной плоскости начнет соответственно перемещаться быстрее вектора \dot{U}_c и опередит его на некоторый угол θ в направлении вращения векторов (см. рис. 5.37, б). При этом в контуре каждой фазы возникает некоторая ЭДС $\Delta \dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{U}_c$, приводящая согласно (5.24) к появлению тока I_1 . С увеличением приложенного внешнего момента будут увеличиваться угол θ , $\Delta \dot{E}$, и I_1 . Вектор тока I_1 отстает от вектора $\Delta \dot{E}$ на 90° , поскольку его величина и направление определяются индуктивным сопротивлением X_c . Угол между векторами \dot{E}_0 и I_1 (угол ψ) будет небольшим, и генератор начнет отдавать в сеть активную мощность $P = mE_0 I_1 \cos \psi$. При этом на валу генератора возникнет электромагнитный тормозной момент, который будет препятствовать дальнейшему ускорению вращения ротора, вследствие чего частота вращения ротора вернется к синхронной (т.е. $\omega = \omega_c$). Чем больше внешний момент, приложенный к валу генератора, тем больше угол θ , а следовательно, ток и мощность, отдаваемые генератором в сеть.

Если произойдет торможение ротора, то вектор \dot{E}_0 будет отставать от вектора напряжения \dot{U}_c на угол θ (рис. 5.37, в). При этом ЭДС $\Delta \dot{E}$ изменит свою фазу и ток I_1 , вектор которого отстает от вектора $\Delta \dot{E}$ на 90° , будет сдвинут относительно ЭДС на угол ψ , близкий к 180° . Поскольку угол $\psi > 90^\circ$ ($\cos \psi < 0$), активная мощ-

ность генератора станет отрицательной. Следовательно, в рассматриваемом режиме активная мощность P забирается из сети и машина работает двигателем, создавая электромагнитный вращающий момент, который уравновешивает внешний тормозной момент; частота вращения ротора при этом снова остается неизменной. Причем с увеличением торможения ротора увеличивается угол θ , $\Delta \vec{E}$ и I_1 . Отсюда следует, что синхронная машина, работая параллельно с сетью бесконечно большой мощности, автоматически стремится поддержать синхронную частоту своего вращения.

Таким образом, для увеличения нагрузки генератора необходимо увеличивать приложенный к его валу внешний момент (т.е. вращающий момент первичного двигателя), а для уменьшения нагрузки — уменьшать этот момент. При изменении направления внешнего момента (если вал ротора не вращать, а тормозить) машина автоматически переходит из генераторного режима в двигательный.

Регулирование реактивной мощности. Если в машине, подключенной к сети и работающей в режиме холостого хода (рис. 5.38, а), увеличить ток возбуждения I_a , то ЭДС \vec{E}_0 станет больше \vec{U}_c . В этом случае возникнет результирующая ЭДС $\Delta \vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{U}_c$ (рис. 5.38, б), совпадающая по фазе с \vec{U}_c и в обмотке якоря согласно формуле (5.24) появится реактивный отстающий ток I_1 (поскольку $X_c \gg R_1$), который создает размагничивающую реакцию якоря, противодействуя увеличению магнитного поля возбуждения. По отношению к сети этот ток является опережающим.

При уменьшении тока возбуждения ток I_1 изменяет свое направление: он опережает на 90° напряжение \vec{U} (рис. 5.38, в) и отстает на 90° от напряжения \vec{U}_c . В результате в машине возникнет намагничивающая реакция якоря, противодействующая сни-

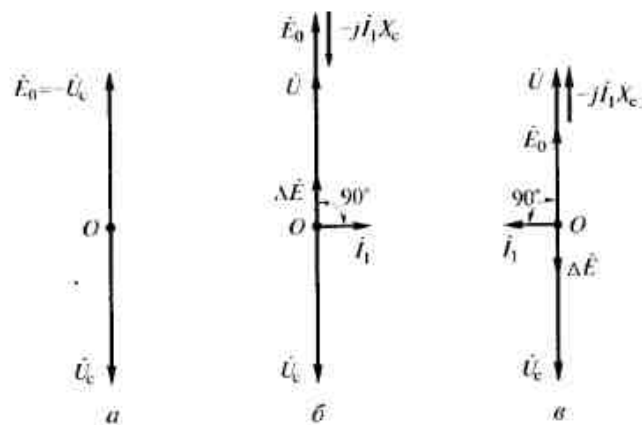


Рис. 5.38. Регулирование реактивной мощности: а — векторная диаграмма синхронного генератора при работе без нагрузки; б, в — то же, при увеличении и уменьшении тока возбуждения

жению возбуждения и обеспечивающая постоянство заданного напряжения на зажимах машины. Таким образом, при изменении тока возбуждения изменяется лишь реактивная составляющая тока I_1 , т.е. реактивная мощность машины Q . Активная составляющая тока I_1 в рассматриваемых случаях равна нулю. Следовательно, активная мощность $P = 0$ и машина работает в режиме холостого хода.

При работе машины под нагрузкой создаются те же условия: при изменении тока возбуждения изменяется лишь реактивная составляющая тока I_1 , т.е. реактивная мощность машины Q . Режим возбуждения синхронной машины с током $I_{н.н.}$, при котором реактивная составляющая тока I_1 равна нулю, называют *режимом полного, или нормального, возбуждения*. Если ток возбуждения I_n больше тока $I_{н.н.}$, то такой режим называют *режимом перевозбуждения*. Если ток возбуждения I_n меньше тока $I_{н.н.}$, то такой режим называют *режимом недвозбуждения*.

Из вышесказанного следует важный вывод: синхронная машина, работающая параллельно с сетью бесконечно большой мощности, противодействует не только изменению частоты вращения ротора, но и изменению возбуждения.

5.17. Режимы работы синхронного генератора при параллельной работе с сетью бесконечной мощности

Для обеспечения заданного режима работы генератора необходимо одновременно регулировать и ток возбуждения, и вращающий момент.

Рассмотрим два предельных случая регулирования:

- электромагнитного момента при неизменном токе возбуждения;

- тока возбуждения при неизменном электромагнитном моменте.

Для простоты выберем неявнополюсный синхронный генератор.

Работа генератора с неизменным током возбуждения. Поскольку в рассматриваемом случае ток возбуждения I_n не меняется, то магнитный поток Φ_n и наводимая им ЭДС E_0 постоянны. В этом случае значение $X_c = X_d$ тоже можно считать постоянным. Из соотношения (5.21) следует, что P_m изменяется только в зависимости от угла θ и представляет собой синусоиду, симметричную относительно осей координат (рис. 5.39).

При изменении нагрузки, например при ее возрастании, следует увеличить момент, приложенный к валу генератора. При этом угол θ должен увеличиться от некоторого значения θ_1 до θ_2 ; в соответствии с возрастанием значения мощности от P_{m1} до P_{m2} . При-

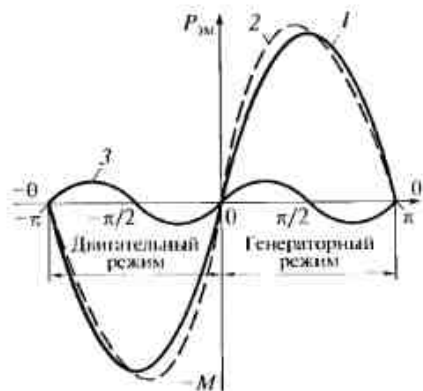


Рис. 5.39. Угловые характеристики неявнополюсной (1) и явнополюсной (2) машины и дополнительная составляющая мощности, возникающая при $X_d \neq X_q$ (3)

нимая полезную мощность (отдаваемую в сеть), равной электромагнитной (см. подразд. 5.15), можно считать, что

$$P_1/P_2 = \sin \theta_1/\sin \theta_2.$$

Аналогичные рассуждения, касающиеся уменьшения нагрузок, приводят к следующему заключению: при уменьшении на-

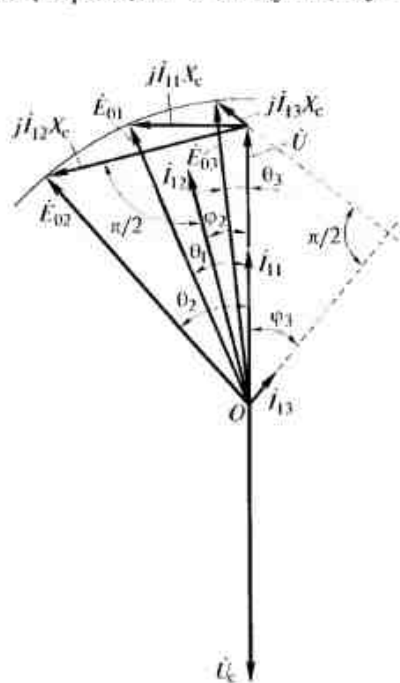


Рис. 5.40. Векторная диаграмма синхронного генератора при неизменном токе возбуждения

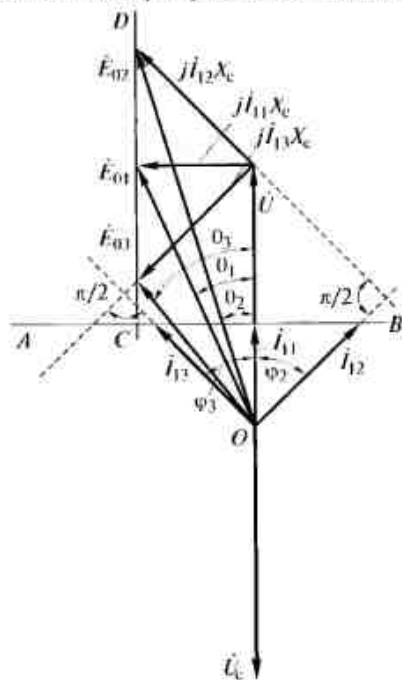


Рис. 5.41. Векторная диаграмма синхронного генератора при неизменном моменте

грузки (уменьшении момента, приложенного к валу генератора) значение P_1 уменьшится до некоторого значения P_3 . При этом угол θ_1 будет меньше угла θ_2 .

Из анализа векторных диаграмм, построенных в соответствии с уравнением (5.12) для неявнополюсного генератора для указанных нагрузок (I_{11} , I_{12} , I_{13}), пренебрегая активным падением напряжения (рис. 5.40), можно сделать ряд выводов:

- при изменении полезной мощности вектор ЭДС \vec{E}_0 поворачивается относительно вектора напряжения \vec{U} на соответствующий угол θ ;
- поскольку величина ЭДС остается неизменной, конец вектора \vec{E}_0 скользит по окружности радиуса $|\vec{E}_0|$;
- вектор $j\vec{I}_1 X_c$, равный разности векторов \vec{E}_0 и \vec{U} , меняет свою величину и направление;
- вектор тока \vec{I}_1 (перпендикулярный вектору $j\vec{I}_1 X_c$) также меняет величину и направление (т.е. появляется $\varphi \neq 0$).

Таким образом, в рассматриваемом режиме одновременно с изменением активной мощности меняется и реактивная мощность. Следовательно, для обеспечения требуемого режима работы при изменении внешнего момента, приложенного к валу генератора, необходимо регулировать и ток возбуждения.

Работа генератора с неизменным моментом. Если к валу генератора приложен неизменный внешний момент, то и полезная мощность, отдаваемая генератором в сеть, остается постоянной, т.е. $P_2 = mUI_1 \cos \varphi = \text{const}$. Поскольку при работе на сеть большой мощности $U = U_c = \text{const}$, то и активная составляющая тока статора $I_1 \cos \varphi = \text{const}$ (независимо от изменения тока возбуждения I_0). На векторной диаграмме (рис. 5.41) $I_1 \cos \varphi$ представляет собой проекцию вектора тока \vec{I}_1 на направление вектора напряжения \vec{U} . Следовательно, конец вектора тока скользит по прямой AB , перпендикулярной вектору напряжения.

Из выражения (5.21) также следует, что при неизменной мощности и изменении тока возбуждения произведение $E_0 \sin \theta$ должно оставаться постоянным. Это обстоятельство на векторной диаграмме отражено тем, что конец вектора \vec{E}_0 скользит по прямой CD , параллельной вектору напряжения \vec{U} . С понижением тока возбуждения уменьшается величина вектора \vec{E}_0 , но увеличивается угол θ . Минимальное значение тока статора соответствует режиму работы генератора при чисто активной нагрузке ($\cos \varphi = 1$) и определенном токе возбуждения и ЭДС E_0 . При любом изменении тока возбуждения (и соответственно ЭДС) увеличивается ток статора I_1 . Как показано в подразд. 5.17, при перевозбуждении (недовозбуждении) генератора появляется соответственно индуктивный (емкостной) ток (относительно генератора), который может быть определен по выражению (5.23). Следо-

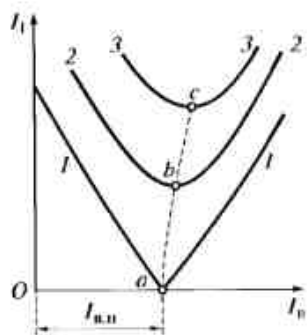


Рис. 5.42. U-образные характеристики синхронного генератора:

1 — $P_2 = 0$; 2 — $P_2 = 0,5P_{2n}$; 3 — $P_2 = P_{2n}$

наибольший из рассматриваемых). В точках *a*, *b* и *c* ток I_f имеет наименьшее значение, $\cos \varphi = 1$. С возрастанием нагрузки точки U-образных характеристик, соответствующие $\cos \varphi = 1$, сдвигаются вправо, так как требуется небольшое увеличение тока возбуждения для компенсации реакции якоря и активного падения напряжения в обмотке статора при увеличении тока статора.

5.18. Электромагнитный момент синхронной машины

При нагрузке генератора на его ротор действует тормозящий электромагнитный момент $M_{эм}$, равный электромагнитной мощности $P_{эм}$, деленной на механическую угловую частоту вращения ротора ω . В соответствии с выражением (5.21) для неявнополюсной синхронной машины

$$M_{эм} = \frac{mE_0U}{\omega X_c} \sin \theta, \quad (5.25)$$

т.е. представляет собой синусоиду, симметричную относительно осей координат (рис. 5.43, кривая 1).

Для явнополюсной машины в соответствии с формулой (5.21) электромагнитный момент

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega} = \frac{mE_0U}{\omega X_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2\omega} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \quad (5.26)$$

вательно, можно рассчитать и построить зависимость $I_f = f(E_0)$ при $U_c = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$. Эта зависимость называется U-образной характеристикой, так как она похожа на латинскую букву «U». Большее практическое значение имеет зависимость $I_f = f(I_a)$. Пока ток I_a невелик и сталь машины не насыщена, ЭДС E_0 и ток I_a взаимно пропорциональны, но затем ток I_a начинает расти быстрее, чем ЭДС E_0 . Поэтому характеристики $I_f = f(I_a)$ несколько отличаются от характеристик $I_f = f(E_0)$, но продолжают сохранять U-образную форму (рис. 5.42). Кривая 1 на рис. 5.42 соответствует режиму холостого хода генератора ($P_2 = 0$), кривые 2 и 3 — различным моментам на валу генератора (момент, соответствующий кривой 3,

имеет две составляющие: основную, обусловленную как величиной ЭДС возбуждения E_0 , так и напряжением U (см. рис. 5.43, кривая 1), и дополнительную, которая зависит только от напряжения, возникает вследствие неодинаковой магнитной проводимости по различным осям ($X_q \neq X_d$) и существует даже в невозбужденной синхронной машине ($E_0 = 0$) (см. рис. 5.43, кривая 2).

В двигательном режиме момент $M_{эм}$ изменяет свой знак и действует на ротор в сторону его вращения, являясь двигательным.

Поскольку электромагнитная мощность $P_{эм}$ пропорциональна моменту, то приведенные на рис. 5.43 характеристики в другом масштабе представляют собой зависимости $P_{эм} = f(\theta)$ или (с учетом рассуждений, изложенных в подразд. 5.15) зависимости $P = f(\theta)$. Кривые $M_{эм} = f(\theta)$ и $P_{эм} = f(\theta)$ называют угловыми характеристиками.

Полученная форма кривой $M_{эм} = f(\theta)$ физически обусловлена тем, что оси потока возбуждения Φ_0 , совпадающего с осью полюсов ротора, и результирующего потока статора $\sum \Phi$ сдвинуты между собой на угол θ . Поле возбуждения создает ЭДС E_0 , а результирующее поле статора — $\sum E$ (см. подразд. 5.10) и напряжение на зажимах генератора U . Каждая из этих ЭДС отстает от создающего ее потока на $\pi/2$, следовательно, векторы \vec{E}_0 и \vec{U} сдвинуты на тот же самый угол θ . Поэтому если угол $\theta = 0$ (холостой ход), то между ротором и статором существуют только силы притяжения $F_{пр}$,

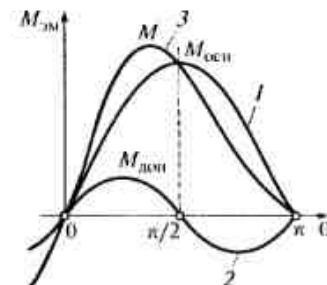


Рис. 5.43. Угловая характеристика момента (мощности) явнополюсного синхронного генератора:

1 — основная составляющая; 2 — дополнительная составляющая; 3 — сумма ординат 1 и 2

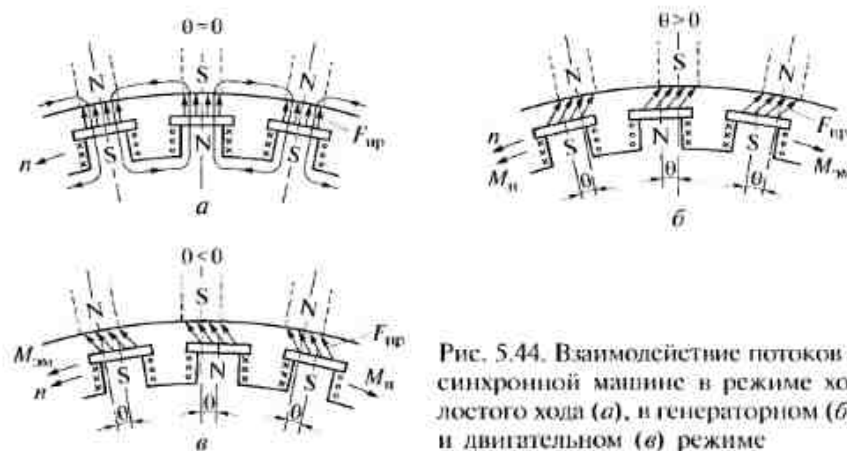


Рис. 5.44. Взаимодействие потоков в синхронной машине в режиме холостого хода (а), и генераторном (б) и двигательном (в) режиме

направленные радиально (рис. 5.44, а), и электромагнитный момент равен нулю.

При $\theta > 0$ (генераторный режим) ось потока возбуждения Φ_0 (полюсов ротора) под действием вращающего момента первичного двигателя M_n опережает ось суммарного потока $\sum\Phi$ на угол θ (рис. 5.44, б), вследствие чего электромагнитные силы, возникающие между ротором и статором, образуют тангенциальные составляющие, которые создают электромагнитный тормозной момент $M_{эм}$. Максимальный момент соответствует значению $\theta = 90^\circ$ (для неявнополюсной машины). При этом ось полюсов ротора расположена между осями «полюсов» суммарного потока $\sum\Phi$.

При $\theta < 0$ (двигательный режим) ось потока возбуждения под действием тормозного момента нагрузки M_n отстает от оси суммарного потока (рис. 5.44, в), вследствие чего тангенциальные составляющие электромагнитных сил, возникающие между ротором и статором, создают электромагнитный вращающий момент $M_{эм}$.

5.19. Перегрузочная способность генератора

Угловая характеристика синхронной машины важна для оценки статической устойчивости и степени перегружаемости.

На практике нагрузка синхронного генератора непрерывно меняется вследствие включений и отключений различных приемников и ряда других причин. При любом изменении режима работы синхронной машины в ней имеют место различные переходные процессы. В данном случае будем рассматривать лишь такие изменения режима работы синхронного генератора, которые происходят очень медленно, что позволяет пренебречь переходными процессами. Такие режимы работы и соответствующие им угло-

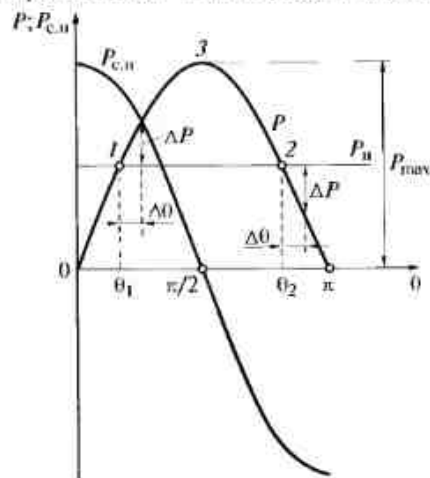


Рис. 5.45. Угловая характеристика неявнополюсного синхронного генератора:

1, 2 — возможные установившиеся режимы работы генератора; 3 — режим максимальной электромагнитной мощности; θ — угол нагрузки

вые характеристики, рассмотренные в подразд. 5.18, называют *статическими*.

Рассмотрим неявнополюсной генератор, работающий параллельно с сетью бесконечной мощности ($U_c = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$) с неизменным возбуждением ($E_0 = \text{const}$). Его угловая характеристика представлена на рис. 5.45.

Допустим, что синхронный генератор работает при некотором внешнем моменте M_n , передаваемом его ротору первичным двигателем. Мощность первичного двигателя P_n не зависит от угла θ и изображена на рис. 5.45 прямой линией, параллельной оси абсцисс. Пересечение угловой характеристики с прямой $P_n = \text{const}$ (точки 1 и 2) определяет два возможных установившихся режима работы генератора, при которых электромагнитный (тормозящий) момент генератора $M_{эм}$ уравнивает вращающий момент первичного двигателя M_n .

Рассмотрим режим, соответствующий точке 1 (см. рис. 5.45). Если в результате неизбежных колебаний нагрузки ротор генератора получит некоторое ускорение и угол θ возрастет на некоторую малую величину $\Delta\theta$, то точка 1 сместится вверх по угловой характеристике в соответствии с положительным приращением мощности генератора ΔP , а приводной двигатель сохранит при этом свою мощность. Соответствующий избыточный момент $\Delta M_{эм}$ будет затормаживать ротор, угол θ уменьшится до первоначального значения, и генератор вернется к исходному режиму работы, соответствующему точке 1. В этом случае

$$\Delta M_{эм} = -J(d\omega/dt), \quad (5.27)$$

где J — динамический момент инерции; ω — синхронная частота вращения.

В точке 2 положительному приращению $\Delta\theta$ соответствует отрицательное приращение мощности ΔP (и соответственно момента $\Delta M_{эм} = J(d\omega/dt)$). В результате равновесие моментов, действующих на вал ротора, нарушится. Ротор будет продолжать ускоряться, угол θ возрастет еще больше, и генератор выпадет из синхронизма, т. е. начнет вращаться с частотой, отличной от частоты вращения магнитного поля статора. Рассматривая отрицательные приращения угла θ , приходим к тем же результатам.

Таким образом, критерием устойчивой работы является соблюдение условия

$$dP/d\theta > 0 \quad \text{или} \quad dM/d\theta > 0.$$

Переходя к пределу, эти соотношения принимают вид

$$dP/d\theta > 0 \quad \text{или} \quad dM/d\theta > 0. \quad (5.28)$$

Выпадение из синхронизма является аварийным режимом, так как оно сопровождается появлением больших токов в обмотке

якоря. Это объясняется тем, что в отличие от номинального режима работы при выпадении из синхронизма ЭДС генератора E_0 и напряжение сети U_c могут складываться по контуру генератор—сеть.

Для неявнополюсной машины угол $\theta = \pi/2$, называемый критическим, и соответствующая ему мощность (см. рис. 5.45, точка 3)

$$P_{\max} = mE_0U/X_c$$

определяют предел статической перегружаемости.

Для явнополюсной машины максимальная мощность P_{\max} и предел статической устойчивости достигается при $\theta_{кр} < \pi/2$ (см. рис. 5.43, кривая 3).

Отношение наибольшей электромагнитной мощности (момента), развиваемой генератором при номинальном напряжении и номинальном возбуждении, к электромагнитной мощности (моменту) номинального режима

$$K_M = \frac{P_{\text{эл. макс}}}{P_{\text{эл. ном}}} = \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{ном}}} = \frac{mE_0U/X_c}{mE_0U \sin \theta_{\text{ном}}/X_c} = \frac{1}{\sin \theta_{\text{ном}}} \quad (5.29)$$

называется *перегрузочной способностью генератора*.

Из формулы (5.29) следует, что перегрузочная способность тем больше, чем меньше угол $\theta_{\text{ном}}$, а из выражения (5.21) — что при заданной номинальной мощности $P_{\text{ном}}$ и напряжении сети U_c угол $\theta_{\text{ном}}$ можно уменьшить, увеличивая ЭДС E_0 или уменьшая X_c . Уменьшить синхронное индуктивное сопротивление X_c возможно лишь на стадии проектирования машины, увеличив величину воздушного зазора. Таким образом, повысить устойчивость работы машины в эксплуатации возможно только за счет увеличения тока возбуждения. Однако это может привести к перегреву обмотки возбуждения. Кроме того, в подразд. 5.17 было показано, что при изменении тока возбуждения в генераторе возникает реактивный ток, а поэтому во избежание перегрева обмотки якоря необходимо недогружать генератор активной мощностью.

Согласно стандарту перегрузочная способность для мощных генераторов должна быть не менее 1,6... 1,7, а для синхронных двигателей большой и средней мощности — не менее 1,65.

Синхронизирующая мощность и синхронизирующий момент. При некотором отклонении $\Delta\theta$ от установившегося режима несбалансированности мощности ΔP , обуславливающий возврат машины к исходному режиму, будет тем больше, чем круче подъем кривой P , при изменении угла θ , т.е. чем больше производная

$$P_{\text{сн}} = \frac{dP}{d\theta} \quad (5.30)$$

Величину $P_{\text{сн}}$ называют *коэффициентом синхронизирующей мощности*, а величину

$$\Delta P = \frac{dP}{d\theta} \Delta\theta = P_{\text{сн}} \Delta\theta —$$

синхронизирующей мощностью.

Для неявнополюсной машины согласно равенству (5.21) коэффициент синхронизирующей мощности

$$P_{\text{сн}} = \frac{mE_0U}{X_c} \cos \theta, \quad (5.31)$$

а для явнополюсной машины согласно соотношению (5.20)

$$P_{\text{сн}} = \frac{mE_0U}{X_d} \cos \theta + mU^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos 2\theta. \quad (5.32)$$

Синхронизирующей мощности ΔP , равной небалансу мощностей генератора и привода, соответствует действующий на ротор генератора синхронизирующий момент ΔM . Он обусловлен разностью электромагнитного момента генератора и момента вращения привода. Величину

$$M_{\text{сн}} = P_{\text{сн}}/\omega$$

называют *коэффициентом синхронизирующего момента*. Для неявнополюсной машины

$$M_{\text{сн}} = \frac{mE_0U}{\omega X_c} \cos \theta,$$

для явнополюсной

$$M_{\text{сн}} = \frac{mE_0U}{\omega X_d} \cos \theta + \frac{mU^2}{\omega} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos 2\theta.$$

Коэффициент синхронизирующей мощности $P_{\text{сн}}$ и коэффициент синхронизирующего момента $M_{\text{сн}}$ положительные в устойчивых областях работы и отрицательные в неустойчивых. Поэтому критерий статической устойчивости вместо неравенства (5.28) можно также представить в виде $P_{\text{сн}} > 0$ или $M_{\text{сн}} > 0$.

Коэффициенты $P_{\text{сн}}$ и $M_{\text{сн}}$ можно рассматривать так же, как величины, характеризующие степень статической устойчивости машины: чем больше $P_{\text{сн}}$ и $M_{\text{сн}}$, тем больше силы, стремящиеся вернуть ротор генератора в исходный установившийся режим работы. На пределе статической устойчивости $P_{\text{сн}} = M_{\text{сн}} = 0$.

Динамическая устойчивость синхронного генератора. Большое значение имеет динамическая устойчивость синхронного генератора, под которой понимают способность генератора выдерживать внезапные изменения нагрузки без выпадения из синхронизма. Предельным случаем внезапного изменения нагрузки является

короткое замыкание в сети. При этом напряжение сети U_c обычно сильно понижается, соответственно чему понижается и степень устойчивости параллельно работающих генераторов. Наиболее действенным средством избежать расстройств работы системы является форсировка возбуждения синхронных генераторов (см. подразд. 5.4).

5.20. Колебания при параллельной работе синхронных машин

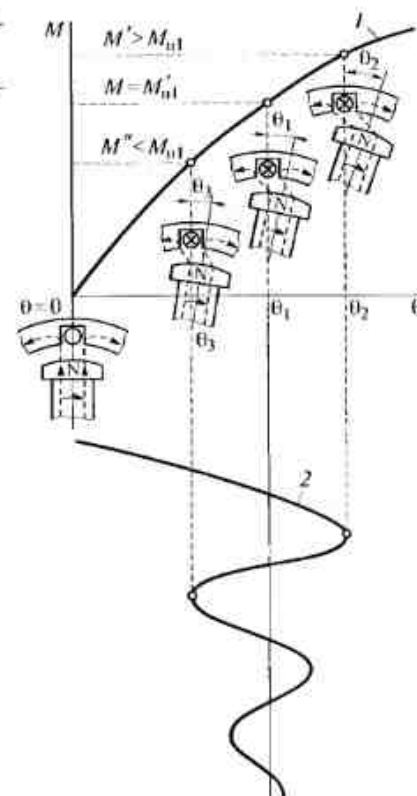
Ротор синхронной машины вместе с сочлененными с ним вращающимися частями приводных устройств обладает динамическим моментом инерции J (см. подразд. 5.20). Если нарушено равновесие между вращающим и электромагнитным моментом, момент инерции совместно с синхронизирующим моментом ΔM может вынудить ротор колебаться с некоторой частотой около синхронной частоты вращения. Одновременно с колебаниями частоты вращения ротора происходит колебание угла θ и соответствующей ему электромагнитной мощности (момента).

Колебания могут быть свободными (или собственными) и вынужденными.

Свободные колебания синхронной машины. В процессе работы синхронной машины параллельно с мощной сетью при изменении нагрузки угол θ устанавливается не сразу, а после некоторого колебательного процесса. Эти колебания возникают при всяких резких нарушениях или изменениях режима работы синхронной машины (сброс или наброс нагрузки, изменения напряжения или тока возбуждения и т. п.). Колебания, возникающие при внезапном увеличении вращающего момента, изображены на рис. 5.46. В соответствии с угловой характеристикой (см. рис. 5.43) при увеличении вращающего момента от значения M_0 до M_{01} ось полюсов ротора должна занять положение, определяемое углом θ_1 и электромагнитным моментом $M = M_{01}$. Однако под действием инерции вращающихся масс синхронной машины и приводного двигателя ротор повернется на угол $\theta_2 > \theta_1$, при этом нарушится равновесие моментов ($M' > M_{01}$) и ротор начнет тормозиться, стремясь занять положение, соответствующее углу θ_1 . Но и в этом случае силы инерции вынудят ротор занять положение, соответствующее некоторому углу $\theta_3 < \theta_1$, при котором электромагнитный момент генератора $M'' < M_{01}$, и ротор начнет поворачиваться в направлении увеличения угла θ . Таким образом, рост вращающего момента сопровождается колебаниями ротора. Эти колебания называются *собственными*, их частота обычно составляет 0,5...2 Гц. Успокоительный момент создается за счет токов, индуцируемых при колебаниях ротора в обмотках возбуждения и демпферной. Кроме того, при колебаниях

Рис. 5.46. Колебания синхронной машины:

1 — угловая характеристика; 2 — затухание колебаний ротора



ротора его частота вращения становится неравномерной, т. е. происходит его движение относительно магнитного поля статора. Это приводит к появлению вихревых токов в сердечнике ротора, взаимодействие которых с магнитным полем статора также приводит к затуханию колебаний ротора. В результате через некоторое время ротор займет положение, соответствующее углу θ_1 , при котором устанавливается равновесие моментов.

Вынужденные колебания синхронной машины. Такие колебания возникают, когда механический момент на валу непостоянен и содержит пульсирующие составляющие, например в дизель-генераторах и двигателях, работающих с поршневыми компрессорами. Вынужденные колебания становятся особенно опасными и сильными, когда их частота близка к частоте собственных (свободных) колебаний, поскольку при этом возможно возникновение резонансных явлений, и колебания резко усиливаются, а параллельная работа генератора становится невозможной.

Успокоительная (демпферная) обмотка способствует затуханию вынужденных колебаний. С этой же целью в таких машинах устанавливаются дополнительные маховики.

5.21. Внезапное и установившееся короткое замыкание синхронных генераторов

Под внезапным коротким замыканием понимают переходный режим, продолжающийся от начала короткого замыкания обмотки якоря до достижения током установившегося значения, характеризующего режим установившегося короткого замыкания. Обычно сначала возникает одно- или двухфазное короткое замыкание, которое затем может перейти в трехфазное (рис. 5.47).

Несмотря на то что внезапное короткое замыкание длится весьма короткий промежуток времени, происходящие при этом переходные процессы могут вызвать повреждение машины и, следовательно, значительные убытки, связанные с перерывом энергоснабжения объектов, получающих питание от генератора, так как значения токов могут превосходить номинальные в 10—15 раз.

Рассмотрим случай внезапного трехфазного короткого замыкания генератора в предположении, что замыкание произошло не в сети, а на зажимах генератора. Для упрощения рассмотрения переходного процесса синхронного генератора пренебрегаем активным сопротивлением всех его обмоток (статора, возбуждения и успокоительной), т. е. обмотки считаем сверхпроводниками ($R = 0$). Это допущение значительно упрощает рассмотрение процесса, не внося заметных погрешностей, особенно для крупных машин, активное сопротивление обмоток которых весьма незначительно. Кроме того, поскольку число фаз многофазной машины не изменяет принципиальной картины процесса внезапного короткого замыкания, рассмотрим только одну фазную обмотку, состоящую из одной катушки ($C1—C4$).

Если предположить, что сверхпроводник представляет собой замкнутый контур, то по второму правилу Кирхгофа

$$e_m + e_L = iR = 0, \quad (5.33)$$

где $e_m = -d\psi_m/dt$ — мгновенное значение ЭДС, наведенной в контуре какой-либо внешней причиной; $e_L = -d\psi_L/dt$ — мгновенное значение ЭДС самоиндукции.

Из соотношения (5.33) следует, что полное потокоцепление сверхпроводящего контура обмотки в любой момент времени

$$\Psi = \psi_m + \psi_L = \text{const.} \quad (5.34)$$

Предположим, что короткое замыкание произошло в синхронном генераторе, когда он работал в режиме холостого хода ($I_1 = 0$). Значит, в нем действовал только изменяющийся синусоидально магнитный поток обмотки возбуждения Φ_m . Пусть в момент внезапного короткого замыкания поток Φ_m , пронизывающий катушку $C1—C4$ был равен нулю (рис. 5.48). Тогда при коротком замы-

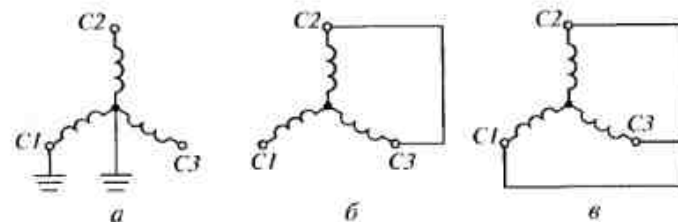


Рис. 5.47. Короткое замыкание синхронного генератора: *a* — однофазное; *b* — двухфазное; *v* — трехфазное

кании в сверхпроводящем контуре $C1—C4$ поток, сцепленный с ним, должен остаться равным нулю и в последующие моменты времени короткого замыкания. Это возможно только при условии, что в катушке $C1—C4$, представляющей собой практически чисто индуктивную нагрузку, появится такой по величине и направлению ток i_k , при котором $\psi_m + \psi_{ad} = 0$. Другими словами, поток якоря Φ_{ad} (штриховая линия на рис. 5.49, 5.50, *a*), создаваемый током i_k , должен быть равен по величине и противоположно направлен потоку Φ_m . Этот поток будет индуцировать в обмотках ротора — возбуждения и успокоительной — дополнительные токи $i_{\Delta n}$ и $i_{\Delta y}$. Согласно принятому условию обмотка возбуждения и успокоительная обмотка представляют собой сверхпроводящие контуры, т. е. сцепленные с ними потоки должны остаться без изменения. Это возможно лишь в том случае, если $i_{\Delta n}$ и $i_{\Delta y}$ будут такими по величине и направлению, что не дадут потоку реакции якоря Φ_{ad} проникнуть в контуры этих обмоток и вытеснят его в воздушный зазор межполюсного пространства (рис. 5.50, *b*). Магнитная проводимость такого пути значительно меньше, чем по стали ротора. Поэтому при внезапном коротком замыкании для создания данного потока якоря Φ_{ad} требуется МДС якоря (и,

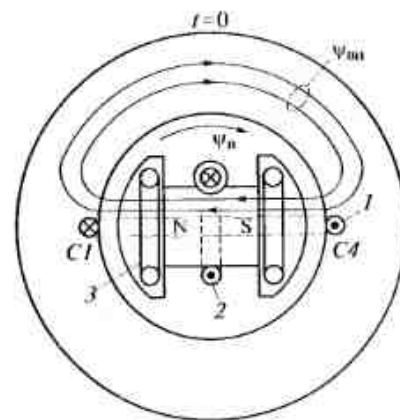


Рис. 5.48. Магнитные потоки при коротком замыкании и при $\Phi_m = 0$: *C1, C4* — начало и конец катушки обмотки якоря; *1* — обмотка якоря; *2* — обмотка возбуждения; *3* — успокоительная обмотка

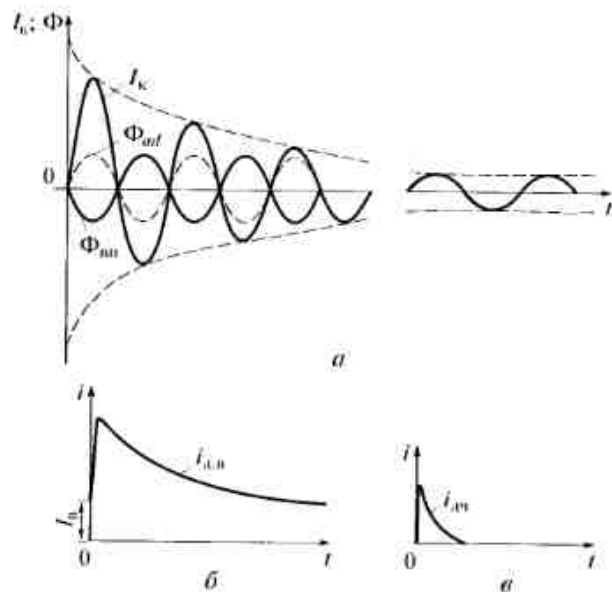


Рис. 5.49. Поток и ток внезапного короткого замыкания при $\Phi_n = 0$:
 а — ток в обмотке якоря; б — ток в обмотке возбуждения; а — ток в успокоительной обмотке

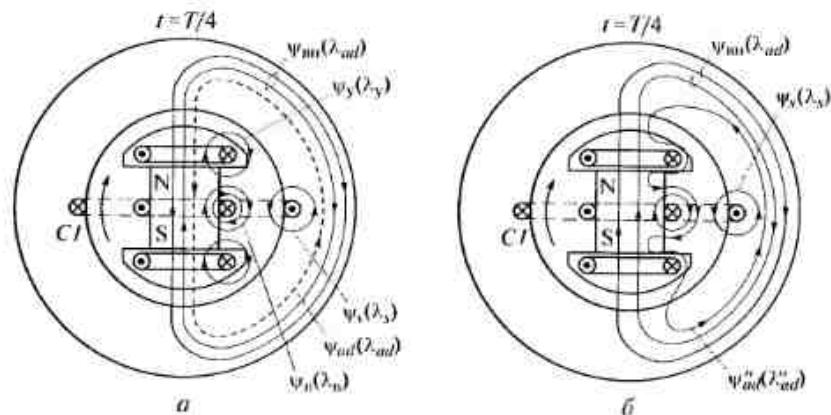


Рис. 5.50. Распределение потокоцеплений:
 а — до короткого замыкания; б — в момент короткого замыкания

следовательно, i_k больше, чем при установившемся коротком замыкании (когда поток реакции якоря проходит по тому же пути, что и основной магнитный поток, — через сердечники полюсов, ярмо и т.д.). Следовательно, при внезапном коротком замыкании поток якоря значительно уменьшится ($\Phi_{ad}'' < \Phi_{ad}$). Соответственно

уменьшится и индуктивное сопротивление обмотки якоря по продольной оси, называемое сверхпереходным ($X_d'' < X_d$). Действующее значение тока внезапного короткого замыкания (ударный ток короткого замыкания) достигнет наибольшего значения (см. рис. 5.49)

$$I_{k \max} = E_0 / X_d''$$

При идеально сверхпроводящем контуре картина потоков оставалась бы такой, как показано на рис. 5.50, б, неопределенно долго. Однако обмотки ротора все же обладают некоторым активным сопротивлением. Вследствие этого начнется процесс затухания дополнительных токов i_{kn} и i_{ky} , зависящий от постоянной времени T данных контуров:

$$T = L/R, \quad (5.35)$$

где L и R — индуктивность и активное сопротивление контура.

Из формулы (5.35) следует, что процесс затухает тем быстрее, чем больше R и меньше L . Обмотка возбуждения имеет большее число витков (т.е. $L_n > L_y$), чем успокоительная, поэтому $T_n > T_y$ и ток в успокоительной обмотке затухает значительно быстрее, чем в обмотке возбуждения. В результате поток якоря, проникая сначала в контур успокоительной обмотки (рис. 5.51, а), увеличится ($\Phi_{ad}' > \Phi_{ad}''$). Соответственно возрастет индуктивное сопротивление статора по продольной оси ($X_d' > X_d''$), называемое переходным индуктивным сопротивлением. При этом уменьшится ток внезапного короткого замыкания до значения

$$I_k' = E_0 / X_d'$$

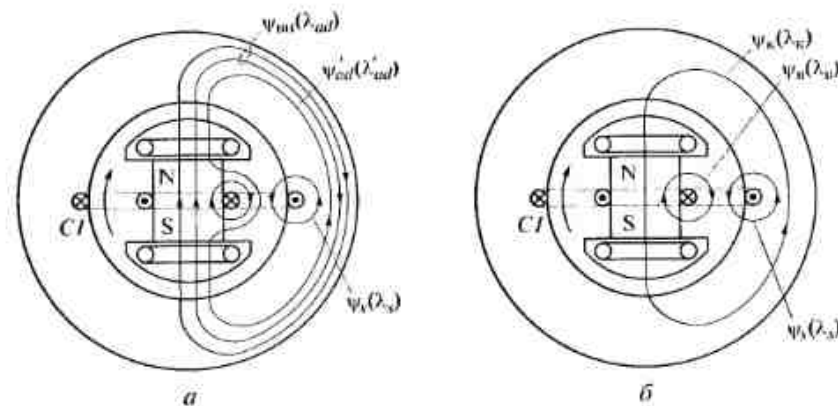


Рис. 5.51. Потокосцепления:
 а — при коротком замыкании; б — при установившемся коротком замыкании

Затем уменьшится до нуля ток в обмотке возбуждения, поток якоря увеличится до величины $\Phi_{ad} > \Phi'_{ad}$ (соответственно и $X_d > X'_d$), а ток в якоре соответственно уменьшится до значения

$$I_{\text{к}} = E_0 / X_d$$

По окончании процесса затухания в генераторе установится результирующий магнитный поток

$$\Phi_{\text{к}} = \Phi_{\text{в}} - \Phi_{\text{ад}}$$

и наступит режим установившегося короткого замыкания (рис. 5.51, б), которому соответствует ток (правая часть рис. 5.49, а)

$$I_{\text{к,уст}} = E_{\text{к}} / X_d \quad (5.36)$$

Таким образом, ток в якоре (см. рис. 5.53, кривая 1) можно рассматривать как сумму трех токов: сверхпереходного, соответствующего успокоительной обмотке, переходного, соответствующего обмотке возбуждения, и установившегося. Его называют *симметричной* или *периодической составляющей тока внезапного короткого замыкания*.

Рассмотрим случай, когда в момент короткого замыкания катушка C1—C4 пронизывается наибольшим потоком $\Phi_{\text{м}} = \Phi_{\text{м, макс}}$ (рис. 5.52), что имеет место при повороте ротора из положения, показанного на рис. 5.48, на угол $\alpha = \pi/2$. Поскольку катушка C1—C4 является сверхпроводящим контуром, то поток, сцепленный с ней, должен оставаться постоянным ($\Phi_{\text{м, макс}} = \text{const}$). Это значит, что в обмотке статора должен быть соответствующий по величине и направлению постоянный во времени ток.

При $R_1 = 0$ этот ток оставался бы постоянным неопределенно долгое время. В действительности он будет затухать по закону по-

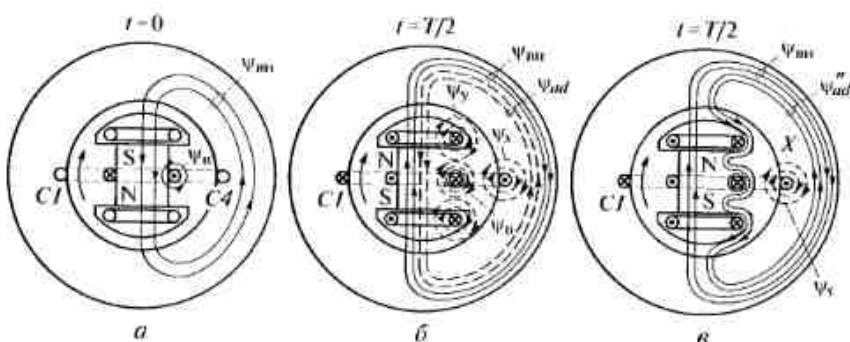


Рис. 5.52. Потокосцепление при внезапном коротком замыкании при $\Phi_{\text{м}} = \Phi_{\text{м, макс}}$

а — до короткого замыкания; б и в — в процессе короткого замыкания

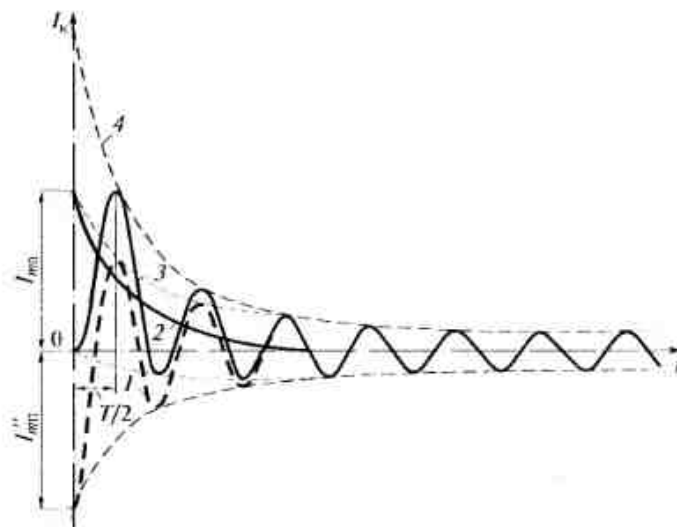


Рис. 5.53. Токи внезапного короткого замыкания при $\Phi_{\text{м}} = \Phi_{\text{м, макс}}$

1 — периодическая составляющая тока; 2 — аperiodическая составляющая тока; 3 — результирующий ток (i_k) внезапного короткого замыкания; 4 — огибающая амплитуд результирующего тока

казательной функции со скоростью, определяемой постоянной времени затухания $T_0 = L_1 / R_1$ обмотки якоря. Этот ток называют *aperiodической составляющей тока внезапного короткого замыкания* (см. рис. 5.53, кривая 2). Эта составляющая тока внезапного короткого замыкания синхронного генератора имеет тот же смысл и возникает при тех же условиях, что и аperiodическая составляющая сверхтока в трансформаторе (см. подразд. 2.17).

В данном случае в статоре кроме трех составляющих тока внезапного короткого замыкания, указанных раньше, имеется еще четвертая — аperiodическая составляющая этого тока, налагающаяся на три первых и совместно с ними образующая результирующую кривую тока внезапного короткого замыкания.

Полная картина тока внезапного короткого замыкания синхронного генератора в рассматриваемый момент представлена на рис. 5.53. Поскольку $R_1 = 0$, то периодическая составляющая тока i_k отстает от ЭДС на $\pi/2$ и, стало быть, в начальный момент короткого замыкания достигает наибольшего значения I''_d (кривая 1 на рис. 5.53).

Аperiodическая составляющая тока i_k на рис. 5.53 изображена сплошной кривой 2. Поскольку, согласно условию, в начальный момент времени ток $i_k = 0$, то начальная амплитуда аperiodической составляющей тока I_d должна быть равна по величине I''_m , но направлена в обратную сторону.

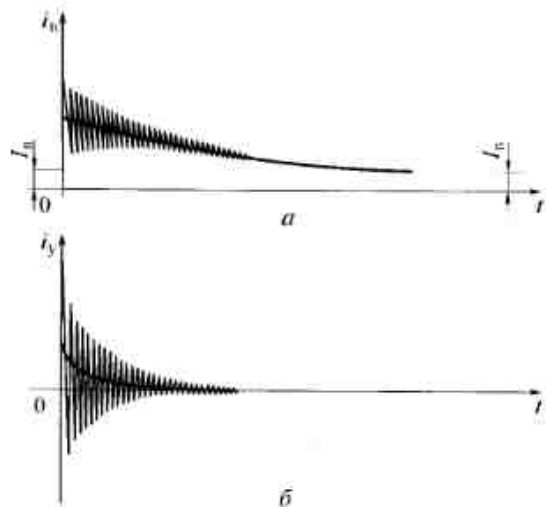


Рис. 5.54. Токи короткого замыкания:

a — в обмотке возбуждения; *b* — в успокоительной обмотке

Кривая 3 результирующего тока внезапного короткого замыкания получена в результате сложения кривых 1 и 2. Кривая 4 представляет собой огибающую амплитуд результирующего тока.

Наличие апериодической составляющей в токе якоря изменяет характер токов, возникающих при внезапном коротком замыкании в обмотках ротора. Поскольку направление апериодического тока является постоянным, он создает в пространстве неподвижное магнитное поле, в котором вращается ротор с синхронной скоростью n . В этом случае в обмотках ротора наводятся переменные токи основной частоты, налагающиеся на токи, показанные на рис. 5.49. *b* и *в*, и взаимодействующие с апериодической составляющей тока в статоре. Результирующие токи в обмотках ротора изображены на рис. 5.54.

5.22. Несимметричные режимы работы синхронных генераторов

Выше рассматривались только симметричные режимы, как при работе, так и при коротких замыканиях. Наличие однофазных нагрузок (например, осветительной сети, тяговых трансформаторов электрифицированных железных дорог и т.п.) приводит к тому, что генераторам часто приходится работать в несимметричных режимах, когда фазные токи синхронных генераторов неодина-

ковые. Предельными случаями таких режимов являются двухфазное и однофазное короткое замыкание.

Работа генератора при несимметричной нагрузке. Для анализа несимметричных режимов используют метод симметричных составляющих. При этом трехфазная несимметричная система токов I_A , I_B и I_C раскладывается на системы токов прямой, обратной и нулевой последовательности.

Система токов прямой последовательности I_{A1} , I_{B1} , I_{C1} создает в трехфазной синхронной машине МДС якоря, вращающуюся синхронно с ротором (с частотой n), т.е. неподвижную относительно обмоток ротора. Этот режим подробно рассмотрен в подразд. 5.21. Индуктивное сопротивление фазы для токов прямой последовательности $X_{np} = X_d$.

Система токов обратной последовательности I_{A2} , I_{B2} , I_{C2} создает МДС якоря, которая вращается относительно якоря с той же частотой n , но в сторону, противоположную вращению ротора. Следовательно, магнитное поле токов обратной последовательности пересекает обмотки ротора с двойной частотой и индуцирует в обмотке возбуждения и успокоительной обмотке ЭДС, имеющую частоту, в 2 раза превышающую частоту ЭДС обмотки якоря. Наличие ЭДС и токов двойной частоты в обмотках ротора требует при расчете токов обратной последовательности использовать сверхпереходные (или переходные) индуктивные сопротивления. Причем для потоков обратной последовательности короткозамкнутая клетка успокоительной обмотки играет ту же роль, что и короткозамкнутая обмотка ротора асинхронной машины относительно вращающегося магнитного потока.

Поток обратной последовательности равномерно пересекает то продольную, то поперечную ось ротора. Следовательно, среднее значение индуктивного сопротивления машины для токов обратной последовательности можно принять равным

$$X_{обр} = X_2 = 0,5(X_d'' + X_q'')$$

Если демпферная обмотка расположена по всей окружности якоря, то

$$X_{обр} = X_2 = X_d'' = X_q''$$

Токи двойной частоты, возникающие в успокоительных обмотках и массивном роторе, вызывают дополнительные потери, которые могут обусловить опасный нагрев ротора и снижение КПД машины. Увеличение сечения стержней успокоительной обмотки не всегда приводит к снижению активного сопротивления (и электрических потерь), так как при двойной частоте значительно проявляется эффект вытеснения тока. Взаимодействие МДС возбуждения ротора и потока обратной последовательности статора соз-

дает знакопеременный колебательный момент, вызывающий вибрацию машины и шум.

Система токов нулевой последовательности I_{A0}, I_{B0}, I_{C0} создает во всех трех фазах МДС, совпадающие по времени, так как

$$I_{A0} = I_{B0} = I_{C0}.$$

При этом для основной гармонической магнитный поток в воздушном зазоре от токов нулевой последовательности равен нулю. Следовательно, токи нулевой последовательности могут создавать только потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 0}$ и нульсирующие потоки гармонических, кратных трем.

Если обмотка выполнена с диаметральной шагом, пути потоков рассеяния для токов нулевой и прямой последовательности совпадают и, следовательно, равны соответствующие индуктивные сопротивления ($X_0 = X_s$). При укорочении шага обмотки индуктивное сопротивление уменьшается и достигает минимума при шаге обмотки, равном $2/3$ полюсного деления, когда во всех пазах проводники нижнего и верхнего слоев принадлежат разным фазам.

Следовательно, при $y = (2/3)\tau$ полный ток нулевой последовательности каждого из пазов равен нулю. Индуктивное сопротивление X_0 определяется только потоком лобовых частей. При рекомендуемом для синхронных машин шаге $y = 0,8\tau$ индуктивное сопротивление X_0 уменьшается почти в 3 раза по сравнению с его значением при диаметральной шаге.

Несимметричное установившееся однофазное короткое замыкание. Простейшим примером несимметричной нагрузки является однофазное короткое замыкание. Этот режим имеет большое практическое значение, так как его результаты можно использовать при определении токов аварийного короткого замыкания. При однофазном коротком замыкании (рис. 5.55) $I_A = I_K, I_B = I_C = 0$ и $U_A = 0$. Для этого режима

$$I_{A1} = I_{A2} = I_{A0} = I_A/3. \quad (5.37)$$

Следовательно, во всех трех фазах возникают токи прямой (индекс «1»), обратной (индекс «2») и нулевой (индекс «0») последовательности, причем $I_{B1} + I_{B2} + I_{B0} = I_B = 0$ и $I_{C1} + I_{C2} + I_{C0} = I_C = 0$.

Вращающийся магнитный поток возбуждения индуцирует во всех фазах ЭДС только прямой последовательности $\dot{E}_1 = \dot{E}_0$. Пренебрегая активными сопротивлениями, для фазы *A* имеем

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A - j\dot{I}_{A1}X_1 - j\dot{I}_{A2}X_2 - j\dot{I}_{A0}X_0 = 0. \quad (5.38)$$

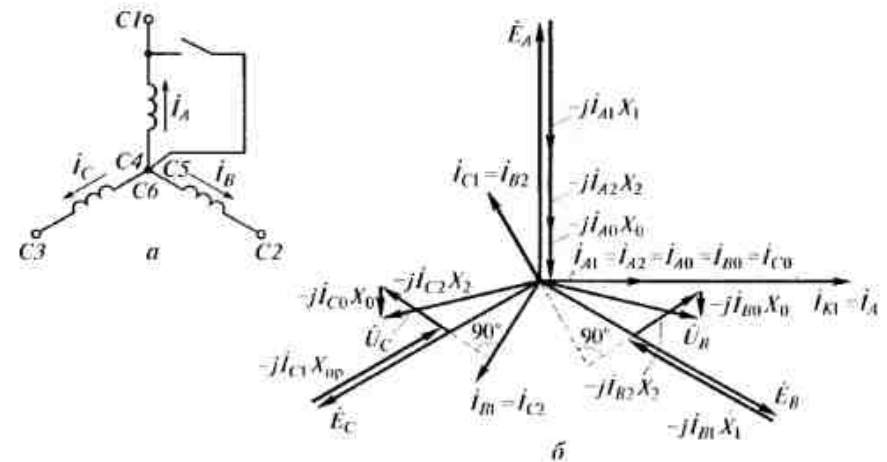


Рис. 5.55. Однофазное короткое замыкание:

a — схема однофазного короткого замыкания; *б* — векторная диаграмма токов и напряжений

С учетом (5.37)

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A - j\dot{I}_A(X_1 + X_2 + X_0)/3,$$

откуда установившийся ток однофазного короткого замыкания

$$I_{K, \text{уст}} = I_A = 3E_0/(X_1 + X_2 + X_0). \quad (5.39)$$

Из сравнения (5.36) и (5.39) следует, что установившийся ток короткого замыкания при однофазном коротком замыкании больше, чем при трехфазном, поскольку $X_1 = X_d$, а X_2 и X_0 меньше X_d .

Уравнения напряжений для фаз *B* и *C* можно вывести из уравнений, аналогичных (5.38).

Несимметричное установившееся двухфазное короткое замыкание фаз. Схема двухфазного короткого замыкания показана на рис. 5.56. В этом случае справедливы следующие соотношения:

$$I_C = 0; \quad \dot{U}_{AB} = 0; \quad \dot{U}_A = \dot{U}_B; \quad \dot{I}_A = -\dot{I}_B.$$

При этом токи нулевой последовательности равны нулю:

$$\dot{I}_0 = (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C)/3 = 0.$$

В фазе *C* сумма токов прямой и обратной последовательности равна нулю:

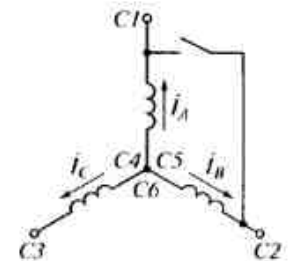


Рис. 5.56. Схема двухфазного короткого замыкания

$$I_C = I_{C1} + I_{C2} = 0, \quad \text{т.е.} \quad I_{C1} = -I_{C2}.$$

Очевидно, что во всех фазах токи прямой и обратной последовательности равны по модулю.

Из уравнений напряжений для фаз *A* и *B*

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A - j\dot{I}_{A1}X_1 - j\dot{I}_{A2}X_2; \quad \dot{U}_B = \dot{E}_B - j\dot{I}_{B1}X_1 - j\dot{I}_{B2}X_2$$

можно определить линейное напряжение

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = \sqrt{3}\dot{E}_0 - jX_1(\dot{I}_{A1} - \dot{I}_{B1}) - j(\dot{I}_{A2} - \dot{I}_{B2}).$$

Поскольку $\dot{I}_{AB1} = \dot{I}_{A1} - \dot{I}_{B1} = \dot{I}_{A2} - \dot{I}_{B2}$, то $\dot{U}_{AB} = \sqrt{3}\dot{E}_0 - j\dot{I}_{AB1}(X_1 + X_2)$, а

$$\dot{I}_{AB1} = -\sqrt{3}j\dot{E}_0/(X_1 + X_2).$$

Учитывая, что $\dot{I}_A - \dot{I}_B = 2\dot{I}_A = (\dot{I}_{A1} - \dot{I}_{B1}) + (\dot{I}_{A2} - \dot{I}_{B2}) = 2\dot{I}_{AB1}$, получаем

$$I_{квсч2} = I_{AB1} = \sqrt{3} \dot{E}_0 / (X_1 + X_2). \quad (5.40)$$

Внезапное (аварийное) короткое замыкание. Рассмотрим начальный процесс двухфазного и однофазного коротких замыканий, пренебрегая затуханием токов в статорных и роторных обмотках.

Пусть внезапное короткое замыкание произошло в момент, когда ось статорной обмотки была перпендикулярна продольной оси ротора (рис. 5.57, *а*), что будет соответствовать возникновению одного только периодического тока в статорной обмотке.

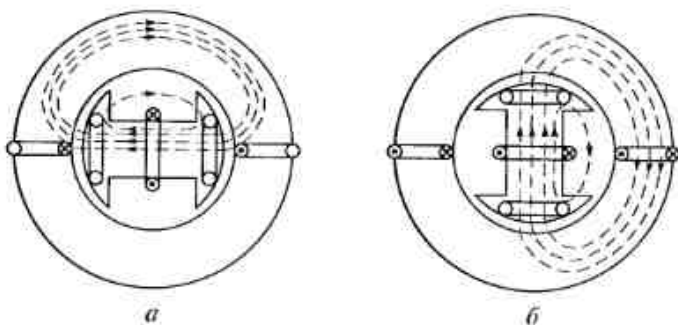


Рис. 5.57. Взаимное положение обмоток статора и ротора при внезапном однофазном коротком замыкании при отсутствии апериодического тока статора:

а — ось статора перпендикулярна продольной оси ротора; *б* — оси совпадают.

Эквивалентная взаимоиנדуктивность *M* статорной и роторной обмоток не будет постоянной, как в случае многофазного короткого замыкания, а будет изменяться по синусоидальному закону.

Если при повороте ротора из начального положения на угол $\pi/2$ взаимоиנדуктивность достигает максимума, то при постоянстве начального значения потока Φ_0 при этом положении ротора возникнет наибольший всплеск тока в обмотке статора, равный E_0/X'_d , и в обмотке возбуждения

$$i_{дв} \approx I_{дв}(X_d - X'_d)/X'_d,$$

который упадет до значения

$$i_{дв} = I_{дв}(X_q - X'_q)/X'_q = 0$$

при повороте ротора на угол π из начального положения.

В результате при наличии в статорной обмотке одной только периодической составляющей тока в обмотке возбуждения будет, в отличие от многофазного короткого замыкания, возникать переменная добавочная составляющая тока возбуждения, пиковые значения которой будут достигать значений постоянной добавочной составляющей при многофазном коротком замыкании. В этом случае в периодических составляющих токов обеих обмоток будет значительное содержание гармонических. Появление этих гармонических объясняется тем, что пульсирующая МДС статорной обмотки создает не только прямо, но и обратно вращающееся синхронное поле, которое при отсутствии полной успокоительной системы на роторе вызывает ток удвоенной частоты в обмотке возбуждения и ток третьей гармонической в статорной обмотке, которые вызовут появление в обмотке возбуждения ряда четных и в статорной обмотке ряда нечетных гармонических тока. Ввиду наличия сопротивления обмотки возбуждения потоки в машине начнут затухать и соответственно начнут затухать токи и в статорной обмотке.

Если внезапное двухфазное или однофазное короткое замыкание началось в момент совпадения оси эквивалентной обмотки статора и оси обмотки возбуждения (рис. 5.57, *б*), то наибольшая взаимоиנדукция этих обмоток будет в начальный момент и через моменты времени, соответствующие повороту ротора от этого положения на угол $2k\pi$, где k — целое число. В этом случае в статорной обмотке появится и апериодическая составляющая тока; поэтому наибольшие начальные всплески токов при пренебрежении активными сопротивлениями получаются в 2 раза больше, чем при наличии только периодического тока короткого замыкания. Апериодическая составляющая статорного тока вызовет появление в обмотке возбуждения нечетных, а в статорной обмотке — четных гармонических тока. Процессы затухания токов носят

такой же характер, как и при симметричном коротком замыкании. После окончания процесса затухания токов и перехода машины в режим установившегося короткого замыкания в обмотке возбуждения остаются заметно выраженные четные гармонические тока.

При наличии полной успокоительной обмотки на роторе или при массивном роторе, имеющемся у неявнополюсных машин (турбогенераторов), обратное синхронное поле является практически затухающим; поэтому гармонические тока статорной обмотки исчезают и процесс начинает носить такой же характер, как при многофазном коротком замыкании. При этом несколько снижаются значения переменных составляющих и в токе возбуждения.

При внезапном однофазном и двухфазном коротких замыканиях трехфазной машины, а также при коротком замыкании однофазной машины кратность начального значения тока будет зависеть от значения апериодической составляющей тока. Если внезапное короткое замыкание происходит в момент прохождения ЭДС обмотки машины через нуль, то возникает максимально возможная апериодическая составляющая тока и поэтому образуется максимальный всплеск начального тока внезапного короткого замыкания, и наоборот, при замыкании обмотки в момент прохождения ее ЭДС через максимум апериодическая составляющая тока получается равной нулю, поэтому сразу наступает периодический режим, при котором получается наименьший возможный всплеск начального тока внезапного короткого замыкания.

При однофазном коротком замыкании обмотка статора создает пульсирующую МДС, вследствие чего создается не только прямое, но и обратное синхронное поле якоря, создающее в обмотках ротора токи удвоенной частоты.

Таким образом, при одно- и двухфазном внезапных коротких замыканиях ток больше, чем при трехфазном аварийном коротком замыкании. Его определяют так же, как и при трехфазном коротком замыкании. При этом действующие значения периодической составляющей тока (сверхпереходного и переходного) можно вычислить по соотношениям (5.39) и (5.40), заменяя $X_{\text{нр}}$ соответственно на X''_d и X'_d . Индуктивные сопротивления X'_2 и X'_0 практически одинаковы при установившемся и переходном режиме.

5.23. Синхронный двигатель

Всякая синхронная машина обратима и может работать как в генераторном, так и в двигательном режимах. Однако почти всегда машина предназначена для определенного режима работы, в

котором она должна обеспечивать конкретные показатели, зафиксированные в технических условиях (номинальный вращающий момент, КПД и др.).

Синхронная машина, предназначенная для работы и в том и в другом режиме, называется *двигателем-генератором*, или *обратимой синхронной машиной*. Эти машины применяют на гидроаккумулирующих электрических станциях (ГАЭС), позволяющих выравнивать нагрузку тепловых электрических станций. Такие ГАЭС имеют два водных бассейна: верхний и нижний. В часы пиковых нагрузок вода перетекает из верхнего бассейна в нижний и обратимые синхронные машины, приводимые во вращение турбинами, работают в генераторном режиме. Во время снижения нагрузки в системе синхронные машины работают и в двигательном режиме, вращая насосы, перекачивающие воду из нижнего бассейна в верхний.

Трехфазные синхронные двигатели выпускают мощностью от 20 кВт до нескольких десятков тысяч киловатт. При частотах вращения от 100 до 1000 мин⁻¹ двигатели имеют обычно явнополюсное исполнение ротора, при больших частотах вращения (1500 и 3000 мин⁻¹) — неявнополюсное. В зависимости от мощности двигателя выполняют на напряжения от 220 до 10 000 В. Частота вращения двигателя определяется частотой сети и не зависит от нагрузки на валу двигателя.

Конструкция двигателей не отличается от конструкции генераторов той же мощности и частоты вращения. Особые требования предъявляются лишь к конструктивному исполнению их демпферной (пусковой) обмотки, с помощью которой производится асинхронный пуск двигателей в определенных условиях.

Синхронная машина, работающая параллельно с сетью, автоматически переходит в двигательный режим, если к валу ротора приложен тормозной момент, что соответствует изменению знака угла θ . Машина начинает потреблять из сети активную мощность, и возникает электромагнитный вращающий момент. При этом ось потока статора опережает ось потока ротора, т. е. воображаемые магнитные полюсы статора опережают полюсы ротора. Вследствие магнитной связи между полюсами вращающегося поля статора увлекает за собой ротор. Чем больше нагружать ротор двигателя, тем сильнее он будет отставать от оси поля статора, и угол θ будет увеличиваться. Режим работы двигателя можно считать установившимся при таком угле θ , когда вращающий и нагрузочный моменты двигателя взаимно уравновесятся.

Пусть P_1 — электрическая мощность, подводимая к двигателю из сети. Часть этой мощности затрачивается на покрытие электрических потерь $P_{\text{эл}}$ и потерь в стали $P_{\text{ст}}$ статора, а остальная часть составляет электромагнитную мощность $P_{\text{эм}}$, передаваемую со статора на ротор. Следовательно,

$$P_{\text{вт}} = P_1 - P_{\text{вт}} - P_{\text{ст}}$$

Электромагнитная мощность $P_{\text{эм}}$ за вычетом механических потерь на трение и вентиляцию $P_{\text{мех}}$ и добавочных потерь на поверхности полюсных наконечников $P_{\text{доб}}$ преобразуется в полезную мощность на валу двигателя P_2 :

$$P_2 = P_{\text{вт}} - P_{\text{мех}} - P_{\text{доб}} = P_1 - P_{\text{вт}} - P_{\text{ст}} - P_{\text{мех}} - P_{\text{доб}}$$

Если возбудитель находится на одном валу с двигателем, то полезная мощность на валу двигателя уменьшается еще на величину мощности, потребляемой возбудителем.

Электромагнитный момент двигателя:

$$M_{\text{эм}} = P_{\text{эм}}/\omega,$$

где $\omega = 2\pi n$ — синхронная угловая скорость вращения ротора.

Поскольку переход из режима работы генератором в режим работы двигателем сопровождается изменением знака угла θ между вектором ЭДС E_0 и вектором напряжения U_c , то выражения для мощностей и моментов для двигательного режима синхронной машины можно вывести из соответствующих выражений для генератора, подставляя в них отрицательные значения угла θ . При этом мощности и момент для двигательного режима получатся отрицательными, так как при выводе этих формул мощность генераторного режима принималась положительной.

Изменение знака мощности указывает на изменение направления потока энергии и на соответствующее изменение режима. Однако действия с отрицательными мощностями и моментами неудобны, и поэтому при рассмотрении синхронных двигателей мощности и моменты двигательного режима принимают положительными. Тогда для получения требуемого выражения для мощности или момента двигателя необходимо в соответствующих соотношениях (например, (5.20) и (5.21)) для генераторного режима заменить θ на $-\theta$ и изменить знак всей правой части выражения, принимая при этом угол θ для двигательного режима уже положительным. При этом вращающий момент и мощность синхронного двигателя рассчитывают по тем же формулам, что и для генератора. Изменение мощности (или момента) этих величин в зависимости от угла θ при постоянном возбуждении оценивают по угловым характеристикам активной и реактивной мощности. О влиянии тока возбуждения на реактивную мощность, развиваемую двигателем, можно судить по U-образным характеристикам в режиме двигателя, которые аналогичны U-образным характеристикам в режиме генератора (см. рис. 5.42).

Работу синхронного двигателя характеризуют рабочие характеристики, представляющие собой зависимость n , M_2 , $\cos \varphi$, I_1 и η от P_2 при неизменном токе возбуждения, напряжении и частоте

сети. На рис. 5.58 изображены рабочие характеристики при токе возбуждения, выбранном таким образом, чтобы при холостом ходе двигатель имел коэффициент мощности, равный единице. С увеличением нагрузки коэффициент мощности падает, а ток становится отстающим. Если ток возбуждения будет выбран так, что двигатель имеет номинальный коэффициент мощности при номинальной нагрузке и опережающем токе, то при снижении нагрузки двигатель будет отдавать в сеть большую реактивную мощность, чем при номинальной нагрузке ($\cos \varphi < \cos \varphi_0$). И наоборот, при увеличении нагрузки коэффициент мощности возрастает в связи с уменьшением опережающей реактивной составляющей тока, становится равным единице и затем снова уменьшается в связи с появлением отстающей реактивной составляющей тока.

Частота вращения синхронного двигателя $n = 60/f/p$ и, следовательно, остается строго постоянной при всех режимах работы машины. Соответствующая характеристика изображена на рис. 5.58 прямой, параллельной оси абсцисс. Вращающий момент $M_2 = P_2/(2\pi n/60)$ изменяется пропорционально полезной мощности P_2 двигателя и изображается прямой, проведенной из начала координат. Характеристика КПД $\eta = f(P_2)$ имеет обычный для всех электрических машин характер. Она быстро растет при увеличении нагрузки от нуля до примерно $P_{\text{ном}}/2$, а в пределах нагрузки от $P_{\text{ном}}/2$ до $P_{\text{ном}}$ меняется мало.

Синхронные двигатели обладают рядом преимуществ по сравнению с асинхронными:

- возможность работы при $\cos \varphi = 1$, что приводит к улучшению $\cos \varphi$ сети, а также к сокращению размеров двигателя, так как его ток меньше тока асинхронного двигателя той же мощности. При работе с опережающим током синхронные двигатели служат генераторами реактивной мощности, поступающей в асин-

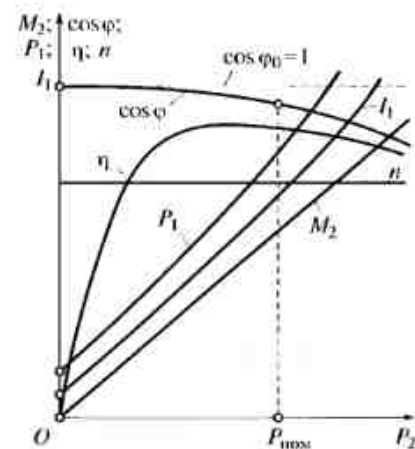


Рис. 5.58. Рабочие характеристики синхронного двигателя

хронные двигатели, что снижает потребление этой мощности от генераторов электростанций;

- имеют меньшую чувствительность к колебаниям напряжения, так как их максимальный момент пропорционален напряжению в первой степени (а не квадрату напряжения);
- строгое постоянство частоты вращения независимо от механической нагрузки на валу.

Однако им присущ и ряд недостатков:

- сложность конструкции и большая стоимость;
- сравнительная сложность пуска в ход (см. подразд. 5.24);
- регулирование частоты вращения возможно только путем изменения частоты питающего напряжения.

Указанные недостатки синхронных двигателей особенно существенны при мощностях менее 100 кВт. При больших мощностях, когда важное значение приобретает величина $\cos \phi$ и габариты машины, синхронные двигатели предпочтительнее асинхронных.

5.24. Пуск в ход синхронного двигателя

Синхронный двигатель не имеет начального пускового момента. Если обмотка статора подключена к сети переменного тока, когда ротор, по обмотке которого проходит постоянный ток, неподвижен, появившееся вращающееся поле статора не сможет сразу увлечь за собой ротор, обладающий значительной инерцией. В результате устойчивая магнитная связь между статором и ротором не возникнет. Следовательно, для пуска синхронного двигателя необходимо разогнать его ротор с помощью внешнего момента до частоты вращения, близкой к синхронной, при которой между статором и ротором устанавливается устойчивая магнитная связь.

Для этой цели можно применить *вспомогательный синхронный двигатель*, расположенный на одном валу с синхронным двигателем. Однако такой метод пуска, особенно при пуске синхронного двигателя под нагрузкой, неэкономичен и относительно сложен, так как необходим асинхронный двигатель большой мощности. Этот метод целесообразно применять для двигатель-генераторов, а также для мощных синхронных компенсаторов. В настоящее время для пуска в основном применяют метод асинхронного пуска.

Асинхронный пуск. Этот способ пуска возможен при наличии короткозамкнутой пусковой обмотки, выполненной аналогично успокоительной обмотке синхронного генератора в виде «беличьей клетки» (рис. 5.59, а). Чтобы увеличить сопротивление стержней «беличьей клетки» изготавливают из латуни. В этом случае при включении трехфазной обмотки статора в сеть вращающееся магнитное поле, взаимодействуя с током I_n в пусковой обмотке, создает электромагнитные силы F и увлекает за собой ротор. После

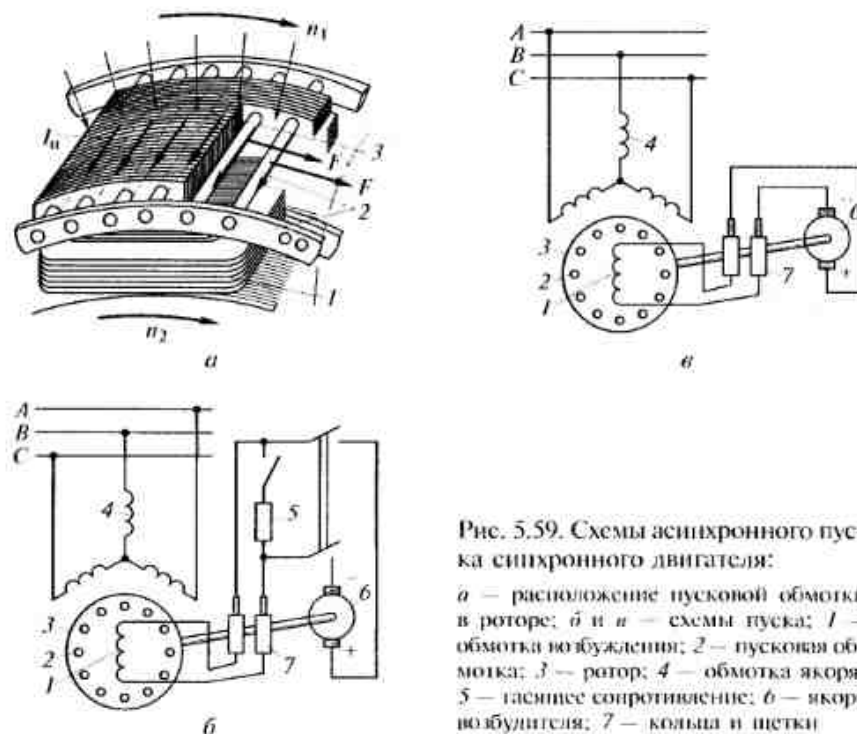


Рис. 5.59. Схемы асинхронного пуска синхронного двигателя:

а — расположение пусковой обмотки в роторе; б и в — схемы пуска; 1 — обмотка возбуждения; 2 — пусковая обмотка; 3 — ротор; 4 — обмотка якоря; 5 — гасящее сопротивление; 6 — якорь возбуждителя; 7 — кольца и щетки

разгона ротора до частоты вращения, близкой к синхронной, постоянный ток, проходящий по обмотке возбуждения, создает синхронизирующий момент, который втягивает ротор в синхронизм. С этого момента пусковая обмотка выполняет функцию успокоительной, ограничивая качания ротора.

Применяют две основные схемы пуска синхронного двигателя. В схеме, изображенной на рис. 5.59, б, обмотку возбуждения сначала замыкают на гасящее сопротивление $R_{доб}$, которое в 8—12 раз превышает активное сопротивление R_n обмотки возбуждения. После разгона ротора до частоты вращения, близкой к синхронной ($s \approx 0,05$), обмотку возбуждения отключают от гасящего сопротивления и подключают к источнику постоянного тока (возбудителю), вследствие чего ротор втягивается в синхронизм. Осуществлять пуск двигателя с разомкнутой обмоткой возбуждения нельзя, так как во время разгона ротора при $s > 0$ в ней вращающимся магнитным полем индуцируется ЭДС

$$E_n = 4,44f_2w_n\Phi = 4,44fsw_n\Phi,$$

где $f_2 = fs$ — частота изменения тока в обмотке возбуждения; w_n — число витков обмотки возбуждения; Φ — амплитуда магнитного потока вращающегося поля.

Вследствие большого числа витков обмотки возбуждения ЭДС E_n в момент пуска ($s = 1$) может достичь весьма большого значения и вызвать пробой изоляции.

В схеме, изображенной на рис. 5.59, а, обмотка возбуждения постоянно подключена к возбудителю, сопротивление которого по сравнению с сопротивлением R_n весьма мало, поэтому эту обмотку в режиме асинхронного пуска можно считать замкнутой накоротко. С уменьшением скольжения до $s = 0,3 \dots 0,4$ возбудитель подает в обмотку возбуждения постоянный ток, обеспечивающий при $s \approx 0,05$ втягивание ротора в синхронизм. Данная схема проще, чем приведенная на рис. 5.59, б, но имеет худшие пусковые характеристики, обусловленные возникновением *одноосного эффекта* — влиянием тока, индуцируемого в обмотке возбуждения при пуске, на характеристику пускового момента вследствие возникновения при асинхронном пуске одноосного момента.

Трехфазный синхронный двигатель с замкнутой обмоткой возбуждения при отсутствии пусковой обмотки представляет собой (в отношении пуска) двигатель с трехфазной первичной обмоткой и однофазной вторичной обмоткой. Последняя создает однофазное пульсирующее поле, которое можно разложить на два вращающихся поля: прямое и обратное, характеризуемые потоками Φ_{np} и $\Phi_{об}$.

Пульсирующее поле ротора имеет частоту $f_2 = sf$. Частота каждого из полей относительно ротора равна $n_1 - n$, где n_1 — частота вращения поля статора, а n — частота вращения ротора.

Прямое поле имеет относительно статора частоту вращения

$$n_{np} = n + (n_1 - n) = n_1,$$

т.е. это поле вращается синхронно с полем, созданным статорной обмоткой при всех частотах вращения ротора.

Обратное поле имеет относительно неподвижной статорной обмотки частоту вращения

$$n_{об} = n - (n_1 - n) = 2n - n_1 = 2n_1(1 - s) - n_1 = n_1(1 - 2s).$$

Это поле создает в статорной обмотке ток, имеющий частоту

$$f_{об} = pn_{об} = pn_1(1 - 2s) = f(1 - 2s); \quad (5.41)$$

при $s = 0,5$ частота $f_{об} = 0$.

При частотах вращения ротора $n_{об} < 0,5n_1$, т.е. при $s > 0,5$, обратное поле, как следует из формулы (5.41), перемещается относительно статора в сторону, противоположную направлению вращения ротора; при $n_{об} > 0,5n_1$ ($s < 0,5$) оно перемещается в ту же сторону, что и ротор.

В обмотке статора обратным полем индуцируется ЭДС с частотой $f_1(1 - 2s)$. При этом по обмотке статора проходит соответствующий ток. Взаимодействуя с обратным полем ротора, этот ток

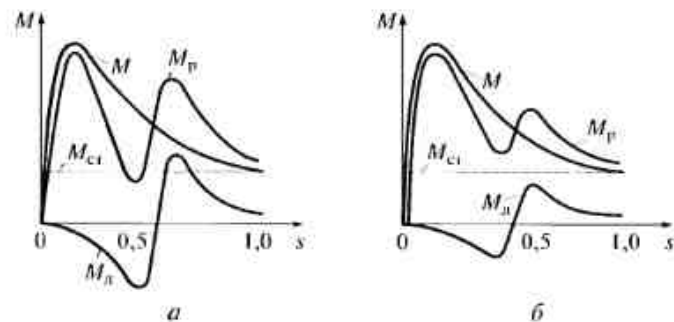


Рис. 5.60. Вращающие моменты синхронного двигателя при асинхронном пуске:

а — с замкнутой накоротко обмоткой возбуждения; б — с дополнительным сопротивлением в цепи возбуждения

создает дополнительный электромагнитный момент M_n . Поскольку направление момента зависит от направления вращения поля $n_{об}$ относительно статора, то из выражения (5.41) следует, что он является знакопеременным и изменение его направления происходит при $s = 0,5$ (рис. 5.60, кривая M_n). При частоте вращения, меньшей $0,5n_1$ ($s > 0,5$), $M_{об}$ является ускоряющим, а при большей частоте вращения ($s < 0,5$) — тормозящим.

При $n = 0,5n_1$ обратное поле становится неподвижным относительно статорной обмотки; в ней не индуцируются дополнительные токи и дополнительные моменты исчезают.

Вращающий момент, создаваемый прямым полем обмотки возбуждения, является двигательным при всех скольжениях (от $s = 1$ до $s = 0$).

Однако значение этого момента в области $s = 0,5$ сильно падает, так как при этом обратное поле обмотки возбуждения не заглушается дополнительными токами статора, вследствие чего результирующее индуктивное сопротивление обмотки возбуждения при $s = 0,5$ велико и токи в ней уменьшаются. Такой характер вращающего момента обмотки возбуждения не позволяет ротору двигателя в отсутствие пусковой обмотки (даже при пуске без нагрузки) развить большую скорость, чем половина синхронной скорости. Это явление носит название одноосного эффекта.

Пусковая обмотка на роторе уменьшает обратное магнитное поле и создаваемый им момент. Однако этот момент, складываясь с асинхронным моментом пусковой обмотки (кривая M_n), создает в кривой результирующего пускового момента провал при частоте вращения, равной половине синхронной (кривая M_n). Этот провал тем глубже, чем больше ток в обмотке возбуждения. Включение гасящего сопротивления в цепь обмотки возбуждения на

период пуска уменьшает ток в этой обмотке и улучшает форму кривой пускового момента.

При достаточно большом значении гасящего сопротивления ($R_{доб} = 8 \dots 12 R_n$) явление одноосного эффекта настолько ослабляется, что опасность «застревания» двигателя около частоты $0,5n_1$ исключается. На рис. 5.60, б видно, что при включении добавочного сопротивления момент обмотки возбуждения M_d уменьшается, результирующий момент M_p при $n = 0,5n_1$ преобладает над моментом сопротивления на валу M_c , и двигатель может набрать скорость, близкую к синхронной.

Если обмотку возбуждения при пуске не отключить от возбуждителя, то по якорю возбуждителя в период пуска будет проходить переменный ток, что может вызвать искрение щеток. Поэтому такую схему пуска применяют в случае небольшого нагрузочного момента — не более 50 % номинального при сравнительно небольшой мощности двигателя.

5.25. Синхронный компенсатор

Синхронным компенсатором (СК) называют синхронную машину, работающую в двигательном режиме без нагрузки на валу, предназначенную для генерирования реактивной мощности. Те же функции могут выполнять и синхронные генераторы, установленные на тепловых и гидравлических электростанциях. Однако синхронные компенсаторы включаются в электрическую систему непосредственно вблизи места потребителя электрической энергии (рис. 5.61). Генерируемую ими реактивную мощность не приходится передавать на большие расстояния. Благодаря уменьшению потерь энергии в линиях электропередач и при промежуточных трансформациях получение реактивной мощности $Q_{СК}$ от синхронных компенсаторов обходится дешевле, чем от синхронных генераторов.

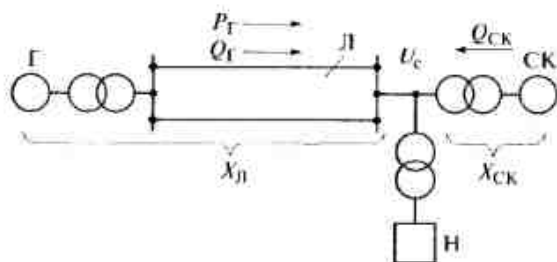


Рис. 5.61. Схема включения СК в электрическую систему: СК — синхронный компенсатор; Г — генератор; Л — линия электропередачи; Н — нагрузка

Затраты, связанные с установкой и эксплуатацией СК в узлах потребления, окупаются, если их мощность составляет 20...30 % полной мощности линии передачи. В этом случае СК на электростанциях производят реактивную мощность, составляющую 60 % полной мощности линии электропередачи, и активную, составляющую 80 % ее полной мощности.

Реактивная мощность, развиваемая СК при параллельной работе с системой, зависит от его тока возбуждения I_n (см. подразд. 5.17). перевозбужденный СК, у которого ЭДС больше напряжения сети, работает с реактивным током $I_{пр}$, опережающим напряжение сети U_c , и отдает реактивную мощность в сеть $Q = UI_{пр} > 0$. Недовозбужденный СК, у которого ЭДС меньше напряжения сети, работает с током $I_{пр}$, отстающим от напряжения сети (см. рис. 5.38), и потребляет реактивную мощность из сети $Q = UI_{пр} < 0$.

За номинальный принимают режим, в котором СК развивает номинальную мощность при перевозбуждении. Он характеризуется следующими параметрами:

- номинальное напряжение СК в соответствии с стандартом устанавливается на 5 или 10 % выше соответствующего номинального напряжения электрической сети;
- номинальная мощность СК определяется как длительно допустимая нагрузка при номинальном напряжении, номинальных параметрах охлаждающей среды. Номинальные мощности СК определяются в киловольт-амперах и должны соответствовать ряду мощностей согласно стандарту;
- номинальный ток статора определяется на основании значений номинальной мощности и номинального напряжения;
- номинальный ток ротора — наибольшее значение тока, при котором обеспечивается номинальная мощность СК в режиме перевозбуждения при отклонении напряжения в сети в пределах ± 5 % номинального напряжения.

В номинальном режиме СК потребляет из системы небольшую активную мощность, которая соответствует имеющимся в нем потерям (в стали, электрическим и механическим). Поэтому ток обмотки якоря СК содержит не только реактивную составляющую $I_{пр}$, но и активную I_a , которая совпадает по фазе с напряжением сети U и настолько мала, что полный ток якоря практически не отличается от реактивной составляющей.

Эксплуатация СК обходится тем дешевле, чем меньше потери активной мощности. Относительные потери активной мощности, т.е. потери, отнесенные к номинальной мощности $S_n = Q_n$, в современных крупных СК не превышают 0,013...0,016 при водородном охлаждении и 0,02...0,024 — при воздушном охлаждении.

Компенсаторы выпускаются на мощности от 10 до 160 МВ·А обычно в горизонтальном исполнении, их номинальные напря-

жения составляют 6,6...15,75 кВ. Частота вращения СК должна выбираться исходя из технико-экономических соображений. Для крупных СК, применяемых в электрических системах, оптимальные частоты вращения (при $f = 50$ Гц) составляют 750...1000 мин⁻¹. Несмотря на то что размеры и масса СК в двухполюсном исполнении при вращении 3000 мин⁻¹ минимальны, их стоимость вследствие удорожания изготовления неявнополюсных роторов возрастает на 20...25%. Кроме того, при частоте вращения 3000 мин⁻¹ заметно возрастают потери на трение, что увеличивает расходы на эксплуатацию таких компенсаторов.

Для включения СК в сеть обычно используют метод асинхронного пуска (см. подразд. 5.25). Отсутствие момента сопротивления на валу (вал ротора СК не передает вращающего момента) облегчает пуск СК по сравнению с пуском нагруженных синхронных двигателей.

Диаметр вала СК может быть уменьшен по сравнению с валом генератора или двигателя той же полной мощности. Это приводит к сокращению размеров подшипников и общих габаритов СК.

Электромагнитные процессы в СК описываются теми же уравнениями и диаграммами, что и в генераторах.

Наибольшее практическое значение имеет U-образная характеристика СК. Эта характеристика ничем не отличается от соответствующей характеристики синхронного генератора при активной мощности, равной нулю, $P = 0$ (см. рис. 5.42). Семейство U-образных характеристик при различных напряжениях сети (при $U_c = U_n = \text{const}$, $U_c = 0,95 U_n$, $U_c = 1,05 U_n$ и т.д.) позволяет судить о реакции СК на изменение напряжения при $I_n = \text{const}$: при снижении напряжения реактивная мощность, отдаваемая им в сеть, увеличивается, при увеличении — падает. Благодаря такой реакции на изменение напряжения СК обладает свойствами стабилизатора напряжения. При автоматическом регулировании напряжения стабилизирующие свойства СК улучшаются.

При выборе параметров СК не нужно заботиться об обеспечении достаточной статической перегрузаемости как в генераторах или двигателях (активная мощность синхронного компенсатора близка к нулю, $P = 0$, и он работает на угловой характеристике при угле $\theta = 0$). Поэтому индуктивное сопротивление якоря по продольной оси выбирается исходя из требуемой величины реактивной мощности в режиме недовозбуждения, $X_d = 2,5...1,65$.

5.26. Испытания синхронных машин

Программы испытаний. Для синхронных машин стандартом установлены программы приемочных, приемосдаточных, периодических и типовых испытаний.

Программа приемочных испытаний включает в себя следующие операции: измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками и сопротивлением обмоток при постоянном токе в практически холодном состоянии; испытания при повышенной частоте вращения, изоляции обмоток относительно корпуса и между обмотками на электрическую прочность и межвитковой изоляции обмоток переменного тока на электрическую прочность; определение характеристики холостого хода, характеристики установившегося трехфазного короткого замыкания (трехфазных машин) или однофазного короткого замыкания (однофазных машин) и тока третьей гармонической (если машина предназначена для работы при соединении обмотки статора в треугольник); измерение тока возбуждения в режиме ненагруженного перевозбужденного двигателя при номинальном напряжении и номинальном токе статора (якоря) и определение U-образной характеристики (для машин частотой 50 Гц и мощностью не более 1000 кВ·А); определение номинального тока возбуждения, номинального изменения напряжения и регулировочной характеристики; испытание на кратковременную перегрузку по току; определение КПД; испытание на нагрев и механическую прочность при ударном токе короткого замыкания; определение коэффициента искажения синусоидальности кривой линейного напряжения; опытное определение индуктивных сопротивлений и постоянных времени обмоток; определение начального пускового, минимального и входного вращающих моментов, начального пускового тока синхронных двигателей и начального пускового тока синхронных компенсаторов (не имеющих пусковых двигателей); испытание электромашинного возбудителя по программе типовых испытаний машин постоянного тока; определение скорости нарастания напряжения возбудителя для синхронного генератора и синхронного компенсатора (для машин мощностью свыше 3000 кВ·А); проверка состояния уплотнений и определение утечки водорода (для машин с водородным охлаждением); измерение вибраций и уровня шума.

Кроме того, в стандартах на отдельные виды синхронных машин приведены дополнительные требования по программе испытаний (например, в ГОСТ 14965—80 «Генераторы трехфазные синхронные мощностью свыше 100 кВт. Общие технические условия»).

В программу приемосдаточных испытаний синхронных машин входят первые семь операций программы приемных испытаний.

Ниже рассмотрены методы испытаний, специфичные для синхронных машин, остальные изложены в соответствующих разделах для других видов электрических машин.

Принимаемые допущения и особенности обработки материалов испытаний. При проектировании и испытании электрических ма-

шин удобно выражать параметры и характеристики в относительных единицах. В качестве базисных значений принимают номинальное значение линейного напряжения U_n и полной мощности S_n . За базисные значения частоты тока или напряжений и угловой частоты машины принимают их номинальные значения $f_b = f_n$; $\omega_b = 2\pi f_n$. За базисное значение тока возбуждения при расчете характеристик и построении диаграмм принимают ток возбуждения, соответствующий номинальному напряжению по характеристике холостого хода I_{0n} . Время выражают в секундах. Вращающий момент можно выражать в долях номинального.

Будем считать, что дополнительно к обмотке возбуждения имеется по одному эквивалентному демпферному контуру по продольной и поперечной осям машины.

Постоянные времени определяют, предположив, что соответствующие переходные составляющие токов и напряжений изменяются по экспоненциальному закону. Если кривая изменения рассматриваемой составляющей, полученная опытным путем, не является строго экспоненциальной, то в качестве эквивалентной постоянной времени принимается время, в течение которого эта составляющая уменьшается до $1/e = 0,368$ своего первоначального значения. Кривые затухания, соответствующие этим постоянным времени, могут рассматриваться как эквивалентные кривые, полученные по данным измерений.

При определении параметров машины по переходным функциям и частотным характеристикам ротор машины можно рассматривать как многоконтурный.

Под понятием «насыщенное значение параметра» будем понимать его значение при номинальном напряжении (кроме синхронных индуктивных сопротивлений), а под понятием «ненасыщенное значение параметра» — значение параметра при номинальном токе якоря.

Значение параметра машины при номинальном напряжении якоря соответствует магнитному состоянию машины при внезапном коротком замыкании на выводах обмотки якоря, которому предшествует работа машины в режиме холостого хода с номинальным напряжением при номинальной частоте вращения. Вместе с тем значение параметра машины при номинальном токе якоря соответствует магнитному состоянию ненасыщенной машины при протекании в обмотке якоря тока с номинальным значением основной гармонической составляющей. Поэтому очень важно для возможности сопоставления опытных параметров и постоянных времени машины указывать способ и значения тока и напряжения, при которых производилось их определение.

Еще одно правило, которого следует придерживаться при испытании синхронных машин, — обмотки должны быть соединены по рабочей схеме и все параметры следует определять примени-

тельно к схеме соединения фаз якоря в звезду, если по условиям проведения опыта не требуется другой схемы соединения обмоток, например в открытый треугольник. В случае соединения обмотки якоря в треугольник полученные значения параметров должны соответствовать эквивалентной обмотке, соединенной в звезду.

Определение характеристики холостого хода. Характеристика холостого хода представляет собой зависимость напряжения обмотки якоря от тока возбуждения, которую обычно определяют при холостом ходе и номинальной частоте вращения машины в режиме генератора, но можно снимать эту характеристику и в режиме ненагруженного двигателя. При снятии характеристики измеряют ток возбуждения, линейное напряжение и частоту (или частоту вращения). Чтобы иметь возможность оценить третью гармоническую составляющую при соединении обмотки статора в звезду, измеряют также фазное напряжение, а при соединении в треугольник (если выведены начала и концы всех фаз) — фазный ток. При снятии характеристики холостого хода частота f (Гц) может несколько отличаться от номинальной $f_{ном}$; в этом случае истинное напряжение (В) холостого хода U_0 может быть найдено по измеренному U следующим образом:

$$U_0 = U f_{ном} / f.$$

Известно, что вследствие явления гистерезиса характеристика холостого хода обычно не проходит через начало координат, поэтому для определенности условились снимать характеристику холостого хода с наибольшего значения тока возбуждения, равного номинальному току возбуждения, но не ниже значения, соответствующего 1,3 номинального напряжения $U_{ном}$ испытываемой машины; ток следует снижать плавно. Чтобы полученную характеристику провести через начало координат, необходимо сместить ее на величину ΔI_e по оси абсцисс (рис. 5.62); значение ΔI_e получают путем графической экстраполяции характеристики до пересечения с осью абсцисс.

Если в синхронных машинах с самовозбуждением выводы обмотки возбуждения доступны, то лучше снимать характеристику холостого хода при питании обмотки возбуждения от постороннего источника. При токе возбуждения, равном нулю, следует измерить остаточное напряжение. Чтобы повысить точность определения этого напряжения, желательно измерять его непосредственно без трансформатора напряжения.

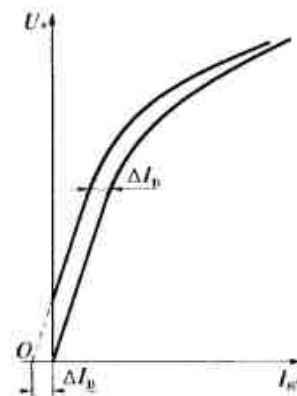


Рис. 5.62. Характеристика холостого хода синхронной машины

Определение характеристики холостого хода при работе синхронной машины в режиме ненагруженного двигателя имеет особенности. Испытуемый двигатель питается переменным током от источника, напряжение которого можно плавно регулировать от значения не менее 1,3 номинального напряжения испытуемой машины до минимально возможного. Характеристика снимается при коэффициенте мощности, равном единице, для чего при каждом значении подаваемого на якорь напряжения необходимо измерять ток возбуждения, добившись его соответствия минимальному току в обмотке якоря. Измерять следует ток возбуждения, линейное напряжение, частоту сети, ток якоря и потребляемую мощность.

Характеристику холостого хода можно снять и на выбеге машины. При этом изменение частоты вращения не должно быть очень быстрым (в 1 с $\Delta n/n_{ном} \leq 0,04$). Непосредственно перед отключением машины от сети устанавливается ток возбуждения, близкий к номинальному. После отключения машины ток возбуждения снижается ступенями; на каждой ступени регистрируются значения перечисленных параметров.

Определение симметричности напряжения. Оценка симметричности производится по отношению разности между наибольшим и наименьшим значениями линейных напряжений измеренными в режиме холостого хода при номинальном напряжении к среднему его значению. Линейные напряжения измеряют одновременно приборами одного класса.

Определение характеристики трехфазного короткого замыкания и тока третьей гармонической. Характеристика установившегося трехфазного короткого замыкания снимается при замкнутых накоротко выводах машины и вращении ее каким-либо приводом; при этом снимают зависимость тока в обмотке якоря от тока возбуждения. Если обмотка якоря соединена по схеме треугольник и выведены начала и концы всех фаз, следует измерять также фазный ток. Третья гармоническая составляющая тока в этом случае оценивается по средним значениям токов:

$$I_{3ф} = \sqrt{I_{ф,ср}^2 - (I_{л,ср}^2/3)},$$

где $I_{ф,ср}$, $I_{л,ср}$ — средние значения фазного и линейного тока, А.

При снятии характеристики короткого замыкания один из отсчетов рекомендуется производить при токе якоря, близком к номинальному. Для получения характеристики короткого замыкания, проходящей через начало координат, снятую при опыте характеристику смещают по оси абсцисс на величину ΔI . Допускается снимать характеристику короткого замыкания на выбеге машины; при этом изменение частоты вращения в 1 с не должно превышать значения $\Delta n/n_{ном} \leq 0,1$.

Измерение тока возбуждения ненагруженной синхронной машины в режиме перевозбуждения при номинальных напряжении и токе якоря. Испытание для определения тока возбуждения, соответствующего номинальным напряжению и току якоря при коэффициенте мощности, равном нулю в режиме перевозбуждения, проводят в режиме генератора или двигателя. Если машина испытывается в режиме генератора, то активная мощность, отдаваемая в сеть, должна быть равна нулю, а в режиме двигателя — равна нулю нагрузка на валу.

При испытании напряжение и ток якоря могут отличаться от номинальных не более чем на $\pm 15\%$. В этом случае для определения тока возбуждения можно применить следующий графический метод (рис. 5.63). В системе координат $U_c = f(I_{я,ср})$ строится характеристика холостого хода 1 и точка С, соответствующая измеренным значениям напряжения и тока возбуждения при коэффициенте мощности, равном нулю, и измеренном токе якоря. Из точки С параллельно оси абсцисс в сторону характеристики холостого хода откладывают отрезок CF, равный току возбуждения, соответствующему по характеристике установившегося короткого замыкания току якоря I_c , измеренному при определении точки С. Далее через точку F проводят прямую, параллельно начальной части характеристики холостого хода до пересечения с ней в точке H. Через точки H и С проводят прямую и из точки H откладывают отрезок HN = HC($I_{ном}/I_c$), где $I_{ном}$ — номинальный ток якоря, А. Затем характеристику холостого хода переносят параллельно самой себе вправо и вниз на расстояние HN так, чтобы точка H соответствовала точке N. Полученная кривая 2 представляет собой нагрузочную характеристику машины при коэффициенте мощности, равном нулю в режиме перевозбуждения. На полученной кривой находят точку А, соответствующую номинальному напряжению. Абсцисса этой точки (OB) определяет ток возбуждения, соответствующий номинальному напряжению и току якоря в режиме перевозбуждения при коэффициенте мощности, равном нулю.

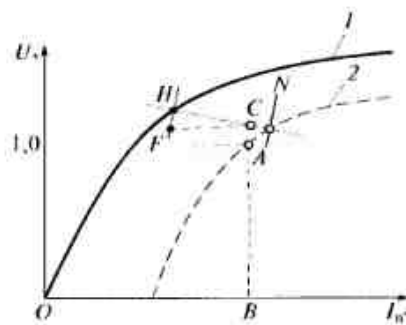


Рис. 5.63. Определение тока возбуждения ненагруженной синхронной машины в режиме перевозбуждения при номинальном напряжении и номинальном токе якоря графическим методом:

1 — характеристика холостого хода; 2 — нагрузочная характеристика.

U-образная характеристика. Эта характеристика представляет собой зависимость тока в обмотке якоря от тока возбуждения при номинальном напряжении на зажимах и неизменной активной мощности (в том числе при активной мощности, близкой к нулю). Для определения U-образной характеристики синхронную машину подключают к сети или к отдельному генератору для работы с номинальным напряжением и частотой в режиме двигателя либо генератора. При испытании измеряют ток, напряжение, мощность и частоту в цепи якоря и ток возбуждения; их измеряют при перевозбуждении и недо возбуждении. Желательно при испытаниях зафиксировать точки: при минимальном значении тока якоря; при токе возбуждения, равном нулю (в режиме недо возбуждения); при токе якоря, равном номинальному (в режиме перевозбуждения).

Определение номинальных тока возбуждения и изменения напряжения. Номинальный ток возбуждения определяют при работе синхронной машины на сеть неизменного напряжения в предназначенном для нее режиме (генератор, синхронный компенсатор или двигатель) с номинальным напряжением, мощностью, коэффициентом мощности и частотой.

Однако непосредственная номинальная нагрузка синхронных машин при испытании не всегда может быть осуществлена. В этих случаях можно использовать метод определения номинального тока возбуждения путем графических построений. Исходными для таких построений являются найденные опытным путем характеристики холостого хода и установившегося трехфазного короткого замыкания и расчетное индуктивное сопротивление X_r , методы определения которого описаны далее.

Построение ведется следующим образом (рис. 5.64). По оси абсцисс откладывают вектор номинального тока якоря испытываемой машины $I_{н.я}$, а под углом $\varphi_{ном}$ к нему — вектор номинального напряжения $U_{ном}$. Из конца вектора $U_{ном}$ перпендикулярно вектору тока откладывают вектор падения напряжения $I_{ном} X_r$. Для машин большой мощности (свыше 20 кВ · А) падением напряжения в активном сопротивлении обмотки якоря можно пренебречь. При необходимости учитывать это падение напряжения следует отложить вектор падения напряжения в активном сопротивлении напрямую последовательности обмотки якоря из конца вектора напряжения параллельно вектору тока якоря (для генератора — в направлении вектора тока, для двигателя — в обратном направлении). Геометрическая сумма векторов номинального напряжения и падения напряжения в индуктивном сопротивлении X_r дает вектор ЭДС E_r . Вектор тока возбуждения $I_{н.р}$, создающего эту ЭДС, можно найти по характеристике I холостого хода, отложим его от начала координат перпендикулярно направлению вектора E_r . Составляющую, компенсирующую реакцию якоря при токе корот-

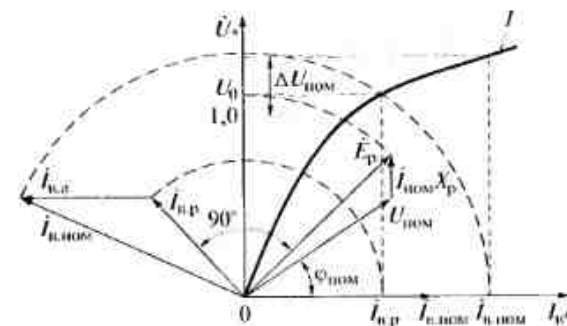


Рис. 5.64. Определение номинального тока возбуждения графическим методом:

I — характеристика холостого хода

кого замыкания, равном номинальному току, откладывают из конца вектора $I_{н.р}$ (см. рис. 5.64). Его величину следует вычислять как разность между током возбуждения $I_{н.ном}$, соответствующим номинальному току якоря, найденному по характеристике короткого замыкания, и током возбуждения $I_{н.р}$, соответствующим падению напряжения в индуктивном сопротивлении X при номинальном токе якоря, определенному по характеристике холостого хода. Геометрическая сумма двух найденных векторов тока возбуждения дает искомым вектор номинального тока возбуждения $I_{н.ном}$.

Номинальное изменение напряжения в относительных единицах $\Delta U_{ном}$ синхронных генераторов можно определить по формуле, приведенной в подразд. 5.10. Напряжение холостого хода U_0 , соответствующее номинальному току возбуждения $I_{н.ном}$, определяют непосредственно испытанием или графически, В.

Регулировочная характеристика. Эта характеристика представляет собой зависимость тока возбуждения от тока якоря при неизменном напряжении, коэффициенте мощности и частоте вращения. Регулировочная характеристика может быть снята при непосредственной нагрузке синхронной машины от сети неизменного напряжения в режиме генератора, двигателя или синхронного компенсатора. При испытании измеряют напряжение, ток, мощность, коэффициент мощности в цепи якоря и ток в цепи возбуждения; один из отчетов рекомендуется выполнять при токе якоря, близком к номинальному.

Регулировочную характеристику можно построить по точкам, полученным методом графических построений, как показано на рис. 5.64. Для этого следует задаться несколькими значениями тока якоря (в пределах от нуля до $I_{н.ном}$) и найти графическими построениями токи возбуждения I_u при заданном напряжении, коэффициенте мощности и частоте вращения.

Определение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения. Допускаемое отклонение от синусоиды обычно оговаривают в технических требованиях к синхронным генераторам. Степень отклонения кривой напряжения от синусоидальной формы принято характеризовать коэффициентом искажения синусоидальности или коэффициентом телефонных гармоник.

Измерения проводят при работе машины в генераторном режиме при холостом ходе и номинальном напряжении. Линейное напряжение машины подводят к соответствующему прибору (анализатор гармонических составляющих, измеритель коэффициента нелинейных искажений или осциллограф). Приборы можно подключать через делитель напряжения или через трансформатор напряжения. Для машин с номинальной частотой до 100 Гц измерения следует проводить при частотах гармонических до 5 000 Гц.

При использовании измерителя коэффициента нелинейных искажений коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K получают в процентах непосредственно со шкалы прибора. Если коэффициент искажения K рассчитывают по амплитудам отдельных гармонических составляющих U_1, U_2, \dots, U_i (измеренных непосредственно или полученных по данным разложения кривой напряжения), то пользуются формулой

$$K = 100 \sqrt{\sum_{i=2}^m U_i^2 / U_1^2}$$

Коэффициент телефонных гармоник k_i в процентах определяют при работе машины с основным возбудителем в режиме холостого хода с номинальным напряжением и частотой с помощью специального прибора или анализатора гармонических составляющих напряжения. При использовании анализатора для каждого из трех линейных напряжений величина k_i рассчитывают по следующей формуле:

$$k_i = 100 \sqrt{\sum_{i=2}^m U_i^2 \lambda_i^2 / U_1^2}$$

где m — число гармонических составляющих линейного напряжения, частоты которых находятся в пределах от номинальной до 5 000 Гц; U_i — действующее значение i -й гармонической составляющей линейного напряжения, В; U_1 — действующее значение линейного напряжения машины, В; λ — весовой коэффициент, выбираемый по табл. 5.1, в зависимости от частоты i -й гармонической составляющей напряжения.

Коэффициент телефонных гармоник машины принимается равным наибольшему значению из трех полученных значений k_i .

Испытание на внезапное трехфазное короткое замыкание. Это замыкание проводят для испытания механической прочности ма-

Частота, Гц	Весовой коэффициент λ_i	Частота, Гц	Весовой коэффициент λ_i	Частота, Гц	Весовой коэффициент λ_i
16,66	0,00000117	1 350	1,57	12 700	1,96
50	0,0000444	1 400	1,58	2 750	1,96
100	0,00112	1 450	1,60	2 800	1,97
150	0,00665	1 500	1,61	2 850	1,97
200	0,0223	1 550	1,63	2 900	1,97
250	0,0556	1 600	1,65	2 950	1,97
300	0,111	1 650	1,66	3 000	1,97
350	0,165	1 700	1,68	3 100	1,94
400	0,242	1 750	1,70	3 200	1,89
450	0,327	1 800	1,71	3 300	1,83
500	0,414	1 850	1,72	3 400	1,75
550	0,505	1 900	1,74	3 500	1,65
600	0,595	1 950	1,75	3 600	1,51
650	0,691	2 000	1,77	3 700	1,35
700	0,790	2 050	1,79	3 800	1,19
750	0,895	2 100	1,81	3 900	1,04
800	1,000	2 150	1,82	4 000	0,890
850	1,10	2 200	1,84	4 100	0,740
900	1,21	2 250	1,86	4 200	0,610
950	1,32	2 300	1,87	4 300	0,496
1 000	1,40	2 350	1,89	4 400	0,398
1 050	1,46	2 400	1,90	4 500	0,316
1 100	1,47	2 450	1,91	4 600	0,252
1 150	1,49	2 500	1,93	4 700	0,199
1 200	1,50	2 550	1,93	4 800	0,158
1 250	1,53	2 600	1,94	4 900	0,125
1 300	1,55	2 650	1,95	5 000	0,100

шины, а также для определения электромагнитных параметров машины.

Непосредственно перед опытом машина должна работать в режиме холостого хода с заданным напряжением при номинальной частоте вращения и отключенном автоматическом регуляторе возбуждения (АРВ).

При проведении опыта замыкают накоротко обмотку якоря. Если имеется последовательная обмотка возбуждения электромашиного возбудителя, то ее необходимо исключить. Если в качестве основной системы возбуждения применена система самовозбуждения с управляемыми вентилями или высокочастотная система возбуждения с неуправляемыми выпрямителями, то для проведения рассматриваемого опыта следует использовать электромашинный возбудитель. При этом его номинальный ток должен в 2 или более раза превышать ток возбуждения холостого хода испытуемой машины.

Возбудитель в этом случае должен иметь независимое возбуждение, а его последовательная обмотка возбуждения, если она имеется, должна быть отключена.

Для оценки результатов испытаний механической прочности узлов машины проводят их тщательный осмотр и испытывают электрическую прочность изоляции обмотки якоря относительно корпуса.

Если необходимо исследовать в процессе опыта деформацию конструктивных узлов машины и их вибрацию, то устанавливают соответствующие датчики.

Опыт внезапного короткого замыкания используется для определения индуктивных сопротивлений, переходных функций и постоянных времени. При этом замыкание трех фаз должно происходить практически одновременно с расхождением по времени не более 15 эл. град. Для определения названных параметров осциллографируют токи во всех фазах якоря и ток в цепи возбуждения.

Запись переходного процесса проводят в течение времени, равного примерно удвоенному значению переходной постоянной времени по продольной оси при замкнутой накоротко обмотке якоря, при этом установившиеся значения измеряют с помощью приборов и регистрируют на осциллографе. Для измерения токов короткого замыкания применяют безындукционные шунты или измерительные трансформаторы.

Чтобы получить параметры, соответствующие ненасыщенному состоянию машины, опыт внезапного короткого замыкания проводят при нескольких значениях напряжения в пределах 0,1...0,4 номинального.

Для каждого напряжения определяют параметры и затем строят зависимости их изменения от начальных значений переходного или сверхпереходного токов.

Ненасыщенные значения параметров находят по этим зависимостям для токов, которые должны быть равны номинальному току якоря.

Значения параметров, соответствующие насыщенному состоянию машины, определяют в тех случаях, когда опыт короткого замыкания может быть произведен при номинальном напряжении на выводах машины. Если это невозможно, то проводят опыты при напряжениях 0,3; 0,5 и 0,7 номинального; определяют параметры для каждого опыта, строят зависимости параметров от напряжения перед опытом и экстраполяцией находят насыщенные значения параметров, соответствующие номинальному напряжению.

По осциллограмме токов внезапного трехфазного короткого замыкания находят зависимость изменения во времени апериодической и периодической составляющих токов в каждой фазе якоря, вычисляемые соответственно как алгебраические полусуммы и алгебраические полуразности ординат верхней и нижней отгибающей фазного тока якоря при коротком замыкании. Периодическую составляющую тока якоря при коротком замыкании вычисляют как среднее арифметическое периодических составляющих токов трех фаз.

Для определения переходной ($\Delta I'_k$) и сверхпереходной ($\Delta I''_k$) составляющих тока из кривой изменения периодической составляющей тока якоря вычитают амплитуду установившегося тока короткого замыкания $I_k(\infty)$. Эту разность, представляющую сумму $I'_k + I''_k$, строят на графике в полупологарифмических координатах.

Начальное значение переходной составляющей тока короткого замыкания получают следующим образом. Если кривая $I(\Delta t_k = f(t))$, рис. 5.65), построенная в полупологарифмических координатах, за исключением начальной части, представляет собой прямую линию (соответствует экспоненте), то, экстраполируя ее на ось ординат, определяют начальное значение $\Delta I'_k(0)$ переходной составляющей тока короткого замыкания. Если кривая $\Delta I_k = f(t)$, построенная в полупологарифмических координатах (рис. 5.66), не имеет прямолинейного участка, то измеряют амплитуду тока I_A , соответствующую времени OA' , где отрезок OA' принимают равным десяти периодам тока или времени, в течение которого сверхпереходная составляющая становится незначительной. Затем находят время OB' , в течение которого ток I_A затухает до значения $I_B = I_A/e$.

Постоянная времени τ_d равна разности $OB' - OA'$ в секундах. Начальное значение переходной составляющей $\Delta I'_k(0)$ определяют экстраполяцией на ось ординат прямой 2, проведенной через точки, соответствующие точкам I_A и I_B (см. рис. 5.66).

Сверхпереходная составляющая тока короткого замыкания представляет собой как разность между кривой $\Delta I'_k + \Delta I''_k$ и прямой, опре-

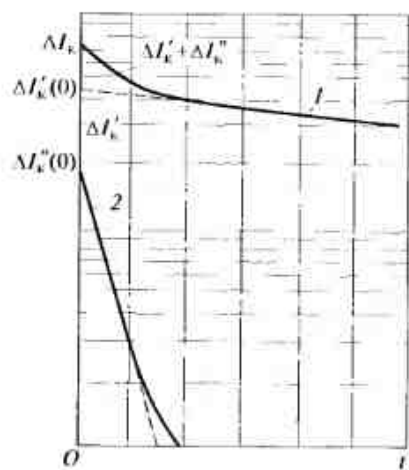


Рис. 5.65. Определение начального значения переходной составляющей тока короткого замыкания $\Delta I_k'(0)$:

1 — экспоненциальная зависимость $\Delta I_k = f(t)$; 2 — сверхпереходная составляющая тока

деляющей значение $\Delta I_k'$. Изменения сверхпереходной составляющей тока 2 во времени также строят в полулогарифмических координатах (см. рис. 5.65). Экстраполяцией прямолинейной части полученной кривой на ось ординат определяют начальное значение сверхпереходной составляющей тока короткого замыкания $\Delta I_k''(0)$.

Апериодические составляющие токов всех фаз строят в зависимости от времени также в полулогарифмических координатах. Экстраполяция этих кривых на момент возникновения короткого замыкания позволяет найти начальные значения соответствующих токов.

Наибольшее возможное значение апериодической составляющей тока может быть определено аналитически (в относительных или физических единицах):

$$I_{a \max} = 2\sqrt{I_{a3}^2 + I_{a1}^2} - I_{a3}I_{a1}/\sqrt{3},$$

где I_{a3} — начальное наибольшее абсолютное значение апериодической составляющей тока, А; I_{a1} — начальное абсолютное значе-

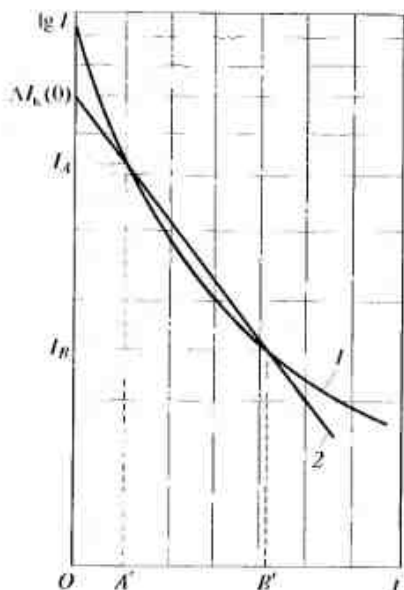


Рис. 5.66. Определение начального значения переходной составляющей тока короткого замыкания $\Delta I_k'(0)$:

зависимость $1 - \lg \Delta I_k = f(t)$ не имеет линейного участка; 2 — прямая, проведенная через точки кривой 1, соответствующие I_1 и I_2

ние апериодической составляющей тока в любой из двух других фаз, А.

По осциллограмме тока в цепи возбуждения при внезапном коротком замыкании обмотки якоря можно определить зависимость периодической составляющей тока от времени как полуразность ординат верхней и нижней огибающих осциллограммы тока в обмотке возбуждения и построить ее в полулогарифмических координатах.

Начальное значение тока периодической составляющей можно найти экстраполицией полученной кривой на время начала короткого замыкания.

В случае если затухание периодической составляющей тока в цепи возбуждения отличается от экспоненциального закона, его начальное значение можно определить экстраполяцией на время начала короткого замыкания касательной к основной части кривой.

Наибольший возможный ударный ток внезапного короткого замыкания можно найти как сумму периодической и апериодической составляющих через 0,5 периода после момента короткого замыкания.

Значение периодической составляющей для этого момента времени определяют как сумму установившегося тока внезапного короткого замыкания, переходной и сверхпереходной составляющих тока.

Последние две составляющие берутся на рис. 5.65 для соответствующего момента времени.

Значение апериодической составляющей через 0,5 периода после момента короткого замыкания определяют с учетом затухания

$$I_a = I_{a \max} e^{-0,5(\tau_a / T_{\text{ном}})},$$

где $I_{a \max}$ — наибольшее возможное значение апериодической составляющей тока внезапного короткого замыкания, А; τ_a — постоянная времени затухания апериодической составляющей тока, с.

Определение отношения короткого замыкания и синхронных индуктивных сопротивлений. Отношение короткого замыкания (ОКЗ) определяют как частное от деления тока возбуждения I_{a0} , соответствующего номинальному напряжению по характеристике 1 холостого хода, на ток возбуждения I_{ak} , соответствующий номинальному току по характеристике 2 установившегося трехфазного короткого замыкания (рис. 5.67):

$$\text{ОКЗ} = I_{a0} / I_{ak}.$$

Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси (X_d) находят по характеристике холостого хода и короткого замыкания как частное от деления напряжения U_{ac} холостого хода,

взятого по прямолинейной части характеристики холостого хода (или ее продолжению — прямая 3) при некотором токе возбуждения, на ток $I_{нс}$ симметричного короткого замыкания, получаемый по характеристике короткого замыкания при том же токе возбуждения (см. рис. 5.67):

$$X_d = U_{нс} / (\sqrt{3}I_{нс}).$$

Полученное таким образом сопротивление X_d является ненасыщенным.

Синхронные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям можно определить из опыта с поворотом фазы. Однако для этого необходим источник переменного напряжения соответствующей частоты и достаточной мощности с регулируемой фазой, что представляет определенные трудности, и поэтому этот метод используют редко.

В машинах с относительно небольшими механическими потерями (меньше 1% суммы потерь) синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси можно определить методом отрицательного возбуждения. При этом машина должна работать параллельно с сетью без активной нагрузки при напряжении, близком к номинальному. Во время опыта ток возбуждения уменьшают до нуля,

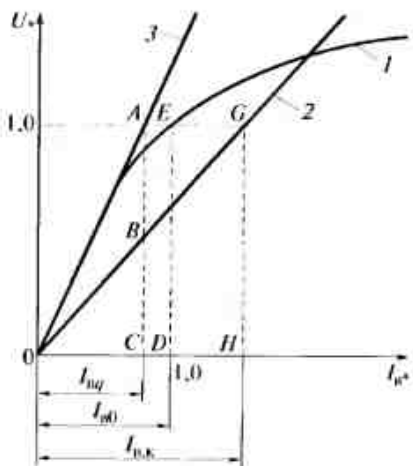


Рис. 5.67. Определение ОКЗ и синхронного индуктивного сопротивления по продольной оси:

1 — характеристика холостого хода; 2 — характеристика короткого замыкания; 3 — продолжение прямолинейного участка кривой 1

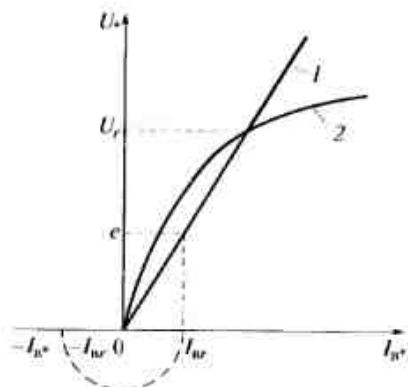


Рис. 5.68. Определение синхронного индуктивного сопротивления по поперечной оси методом отрицательного возбуждения:

1 — спрямленная характеристика холостого хода; 2 — характеристика холостого хода

изменяют направление, а затем плавно увеличивают его до выпадения машины из синхронизма. При этом измеряют напряжение, ток якоря и ток возбуждения вплоть до момента выпадения машины из синхронизма. Сопротивление по поперечной оси равно

$$X_q = \frac{X_d U_r}{U_r + |e|},$$

где $|e|$ — абсолютное значение ЭДС, определяемое по спрямленной характеристике 1 холостого хода (рис. 5.68), проведенной через точку характеристики 2 холостого хода, соответствующую напряжению U_r , для тока возбуждения I_{nr} ; U_r , I_{nr} — напряжение якоря и ток возбуждения непосредственно перед нарушением синхронизма; X_q — синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси, определенное по той же спрямленной характеристике.

Если при проведении опыта удастся определить ток якоря непосредственно перед нарушением синхронизма (I_r), то

$$X_q = \frac{U_r}{\sqrt{3}I_r}.$$

Синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси определяют методом малого скольжения. Для этого обмотку якоря машины, работающей с малым скольжением, питают от источника симметричного напряжения от 0,01 до 0,2 $U_{ном}$. При этом напряжение должно быть таким, чтобы машина не втягивалась в синхронизм.

Обмотка возбуждения должна быть разомкнута, ротор вращается первичным двигателем со скольжением $\leq 0,01$, а для машин с массивным ротором — $s \leq 0,002$, чтобы исключить влияние на полученный результат токов, наведенных при асинхронном режиме в успокоительных контурах. В момент включения или отключения источника питания обмотки якоря обмотка возбуждения должна замыкаться накоротко или на сопротивление во избежание ее повреждения.

При проведении опыта измеряют приборами или записывают на осциллограмму ток и напряжение якоря, напряжение на обмотке возбуждения, скольжение и по возможности угол θ . Сопротивление X_q подсчитывают по измеренным во время опыта току и напряжению якоря при максимальном напряжении U_{m0} на обмотке возбуждения (при этом угол $\theta = 90^\circ$):

$$X_q = \frac{U_{m0}}{\sqrt{3}I_{max}}.$$

Если положение I_{max} не совпадает с U_{m0} , то при расчете X_q следует брать за основу I_{max} и напряжение при этом токе. Значение

U_{\min} определяют как среднее арифметическое двух последовательных минимумов огибающей кривой напряжения. Для контроля полученных результатов из этого же опыта по результатам измерения напряжения и тока в момент, когда напряжение на разомкнутой обмотке возбуждения равно нулю, можно определить X_d .

При этом

$$X_d = \frac{U_{\max}}{\sqrt{3}I_{\min}}$$

Измерения целесообразно повторить при нескольких значениях скольжения и экстраполировать полученные значения X_q и X_d к скольжению $s = 0$. Результаты определения X_q из опыта малого скольжения считают правильными, если полученное из этого же опыта значение X_d совпадает с его значением, полученным другим способом с погрешностью до 5%. Значения X_q , полученные из опыта малого скольжения, соответствуют ненасыщенному состоянию машины.

Существует еще один способ определения синхронного индуктивного сопротивления по поперечной оси — метод нагрузки с измерением угла между ЭДС машины и напряжением на выводах. Этот опыт проводится при работе испытуемой машины параллельно с сетью или на выделенную нагрузку при номинальной частоте.

Активная мощность машины должна быть не менее 0,5 номинальной при коэффициенте мощности, близком к номинальному. При проведении опыта измеряют напряжение U , ток якоря I , определяют угол φ между напряжением и током, а также угол θ (внутренний угол между векторами напряжения на выводах и ЭДС машины), который удобно измерять стробоскопическим методом, и определяют

$$X_q = \frac{U \operatorname{tg} \theta}{\sqrt{3}I(\cos \varphi - \sin \varphi \operatorname{tg} \theta)}$$

Если значением активного сопротивления пренебречь нельзя, то

$$X_q = \frac{U \sin \theta + \sqrt{3}I_d R_a}{\sqrt{3}I_q}$$

где I_d — продольная составляющая тока якоря, $I_d = I \sin(\theta + \varphi)$; I_q — поперечная составляющая тока якоря, $I_q = I \cos(\theta + \varphi)$; R_a — активное сопротивление фазы обмотки якоря.

Если этот опыт проводят при номинальном напряжении, то определяют насыщенные значения X_q для определенной нагрузки.

Переходное индуктивное сопротивление по продольной оси X'_d определяют из опыта внезапного короткого замыкания как отно-

шение напряжения $U(0)$ холостого хода, измеренного непосредственно перед коротким замыканием, к начальному значению $I_k(\infty)$ периодической составляющей тока короткого замыкания, из которого следует вычесть значение $\Delta I'_k(0)$ — переходной составляющей (см. рис. 5.65):

$$X'_d = \frac{U(0)}{\sqrt{3}(I_k(\infty) - \Delta I'_k(0))}$$

Переходное индуктивное сопротивление можно определить и по осциллограмме восстановления напряжения якоря после отключения симметричного короткого замыкания на выводах машины.

При этом получают ненасыщенные значения индуктивного сопротивления. Метод восстановления напряжения состоит в том, что испытуемая машина вращается с номинальной частотой при замкнутой накоротку обмотке якоря. Ток возбуждения устанавливается соответственно линейной части характеристики холостого хода.

Отключение установившегося трехфазного короткого замыкания необходимо производить практически одновременно во всех трех фазах с расхождением по углу в момент гашения дуги в пределах 180 эл. град.

Во время опыта осциллографируют линейные напряжения и токи якоря во всех фазах. На график (рис. 5.69) в полулогарифмических координатах наносят разность установившегося и восстанавливающегося напряжения $U_{c\infty} - U$, которая устанавливается по их амплитудам. Экстраполяция прямолинейной части этого графика на ось ординат позволяет определить начальное значение переходной составляющей напряжения $\Delta U'(0)$. Для получения начального значения сверхпереходной составляющей напряжения $\Delta U''(0)$ на том же графике можно построить разность между напряжением $\Delta U' + \Delta U''$ и переходной составляющей напряжения

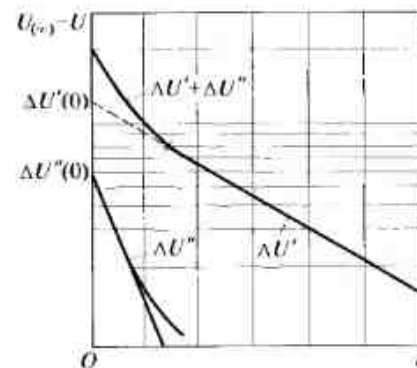


Рис. 5.69. Определение синхронного индуктивного сопротивления по поперечной оси методом восстановления напряжения

$\Delta U'$, экстраполируя ее на момент отключения короткого замыкания.

Переходное индуктивное сопротивление по продольной оси определяют как отношение разности между установившимся напряжением $U(\infty)$ и начальным значением переходной составляющей напряжения $\Delta U'(0)$ к току якоря I_k , измеренному непосредственно перед отключением короткого замыкания:

$$X_d' = \frac{U(\infty) - \Delta U'(0)}{\sqrt{3}I_k}$$

Если известны X_d' , τ_{d0}' и $\tau_{d\infty}'$, то переходное индуктивное сопротивление

$$X_d' = \frac{X_d' \tau_{d\infty}'}{\tau_{d0}'},$$

где $\tau_{d\infty}'$ — переходная постоянная времени по продольной оси, при замкнутой накоротко обмотке якоря, с; τ_{d0}' — переходная постоянная времени по продольной оси при разомкнутой обмотке якоря, с.

Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси. Это сопротивление X_d'' получают экспериментально из опытов: внезапного короткого замыкания; восстановления напряжения; отключения питания или питания обмотки якоря от внешнего источника при двух определенных положениях ротора и одном произвольном положении ротора.

Из опыта внезапного короткого замыкания сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси определяют как отношение напряжения холостого хода $U(0)$, измеренного непосредственно перед коротким замыканием, к начальному значению периодической составляющей тока короткого замыкания, определяемому по осциллограмме:

$$X_d'' = \frac{U(0)}{\sqrt{3}[I_k(\infty) + \Delta I_k'(0) + \Delta I_k''(0)]}$$

Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси определяют из опыта восстановления напряжения как отношение разности между установившимся напряжением $U(\infty)$ и суммой начальных значений переходной $\Delta U'(0)$ и сверхпереходной $\Delta U''(0)$ составляющих напряжения к току I_k якоря, измеренного непосредственно перед отключением короткого замыкания:

$$X_d'' = \frac{U(\infty) - [\Delta U'(0) + \Delta U''(0)]}{\sqrt{3}I_k}$$

Сверхпереходное индуктивное сопротивление можно определить из опыта отключения питания, когда машину с замкнутой накоротко обмоткой возбуждения приводят во вращение со скольжением меньше 1%; обмотку якоря подключают к симметричному трехфазному источнику номинальной частоты с пониженным напряжением (5...10%) U_n .

Отключение следует производить при продольном или поперечном положении ротора, которое определяется путем измерения внутреннего угла θ между векторами напряжения и ЭДС машины.

Во время опыта регистрируют линейные напряжения, токи якоря и положение ротора. Отключение машины следует производить при продольном положении ротора. Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси в этом случае рассчитывают по формуле

$$X_d'' = \frac{U(0)}{\sqrt{3}I(0)},$$

где $\Delta U(0)$ — мгновенное уменьшение напряжения якоря в момент отключения машины; $I(0)$ — ток якоря в момент, предшествующий отключению машины.

Определение сверхпереходных индуктивных сопротивлений из опыта питания обмотки якоря от внешнего источника при двух положениях неподвижного ротора производят при подключении к двум любым линейным выводам обмотки якоря источника переменного тока пониженного напряжения номинальной частоты; при этом обмотка возбуждения замкнута накоротко. В результате опыта находят значения параметров, соответствующих скольжению, равному единице.

Длительность приложения напряжения должна быть ограничена во избежание перегрева частей ротора.

Медленно поворачивая ротор, находят положения, в которых ток в обмотке возбуждения имеет максимальное и практически нулевое значение.

Первое положение соответствует продольной оси, второе — поперечной.

В этих положениях измеряют приложенное напряжение U , ток в обмотке якоря I и потребляемую мощность P . Напряжение, ток и мощность измеряют при максимальном токе в обмотке возбуждения. Если опыт не может быть выполнен при номинальном токе или номинальном напряжении, то для определения параметров, соответствующих пусковым условиям или ненасыщенному состоянию машины, можно провести несколько опытов при различных значениях приложенного напряжения (но не ниже 20% номинального).

По полученным данным строят зависимость определяемого параметра от приложенного напряжения или тока в обмотке якоря.

Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси равно

$$X_d'' = \sqrt{(Z_d'')^2 - (R_d'')^2}, \quad (5.42)$$

где $Z_d'' = U/(2I)$; $R_d'' = P/(2I^2)$.

Определение сверхпереходных индуктивных сопротивлений из опыта питания обмотки якоря от внешнего источника при произвольном положении неподвижного ротора производят при поочередном подключении каждой двух линейных выводов обмотки якоря испытываемой машины к источнику переменного тока пониженного напряжения; при необходимости ротор машины затормаживают.

Измеряют приложенное напряжение, ток и мощность цепи якоря и ток в обмотке возбуждения при подключении каждой пары выводов.

По результатам измерений по формуле (5.42) рассчитывают индуктивные сопротивления между каждой парой линейных выводов обмотки якоря (X_{12} ; X_{23} ; X_{31}).

При этом сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси

$$X_d'' = X_{cp} \pm \Delta X,$$

где $X_{cp} = (X_{12} + X_{23} + X_{31})/3$;

$$\begin{aligned} \Delta X &= \frac{2}{3} \sqrt{X_{12}(X_{12} - X_{23}) + X_{23}(X_{23} - X_{31}) + X_{31}(X_{31} - X_{12})} = \\ &= \sqrt{(X_{cp} - X_{12})^2 + [(X_{23} - X_{31})/3]^2}. \end{aligned} \quad (5.43)$$

Величина ΔX в формуле положительная, если наибольшему из трех измеренных индуктивных сопротивлений якоря соответствует максимальное из трех значений тока в цепи возбуждения, а если соответствует минимальное из трех значений тока в цепи возбуждения, то величина ΔX — отрицательная.

Сверхпереходное индуктивное сопротивление по поперечной оси X_d'' находят из опытов отключения питания; питания обмотки якоря от внешнего источника при двух положениях ротора и питания обмотки якоря от внешнего источника при произвольном положении ротора.

Все перечисленные опыты проводят так же, как для определения сверхпереходных индуктивных сопротивлений по продольной оси. При использовании метода отключения питания обмотки якоря от источника пониженного напряжения отключения

осуществляют при поперечном положении ротора. Сверхпереходные индуктивные сопротивления по поперечной оси определяют по формулам, приведенным в настоящем подразделе, в которых индекс «*d*» следует заменить на индекс «*q*». В формуле (5.43) перед ΔX ставят знак «+», когда наибольшему сопротивлению соответствует минимальное значение из трех значений тока в цепи возбуждения, и знак «-», когда наибольшему из трех измеренных сопротивлений якоря соответствует максимальное из трех значений тока в цепи возбуждения.

Индуктивное и активное сопротивления обратной последовательности. Эти сопротивления определяют из опытов установившегося двухфазного короткого замыкания или обратного чередования фаз.

В опыте установившегося двухфазного короткого замыкания испытываемую машину с замкнутыми между собой двумя фазами вращают первичным двигателем с номинальной частотой при наличии возбуждения и измеряют ток короткого замыкания I_{k2} , ток возбуждения, напряжение U между линейными выводами разомкнутой и одной из замкнутых фаз и потребляемую мощность P . Измерения проводят при нескольких значениях тока короткого замыкания.

Схема для проведения опыта изображена на рис. 5.70. Чтобы избежать чрезмерного нагрева ротора, продолжительность опыта при токах свыше $0,1I_n$ ограничивают временем, необходимым для отчетов по приборам.

У явнополюсных машин, если это позволяет уровень вибрации, ток во время испытаний может быть доведен до номинального значения, а у неявнополюсных машин ток якоря, как правило, не рекомендуется устанавливать выше $0,5I_n$. Индуктивное X_2 и активное R_2 сопротивления обратной последовательности рассчитывают по следующим формулам:

$$X_2 = \frac{P}{\sqrt{3}I_k^2}; \quad R_2 = \frac{\sqrt{U^2 I_k^2 - P^2}}{\sqrt{3}I_k^2}.$$

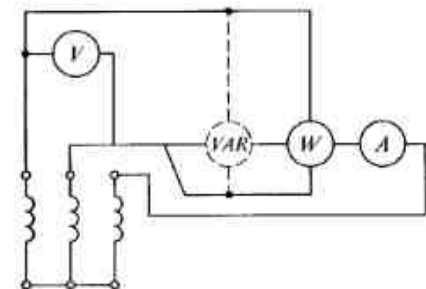


Рис. 5.70. Схема для проведения опыта двухфазного короткого замыкания с целью определения индуктивного и активного сопротивлений обратной последовательности;

V — вольтметр; A — амперметр; W — ваттметр; VAR — измеритель реактивной мощности.

Очень важно при испытаниях определять форму кривых напряжения и тока, а в случае отклонения их от практически синусоидальных в расчет необходимо принимать значения, соответствующие основным гармоническим. Если при опыте измеряют также и реактивную мощность, то

$$X_2 = \frac{U^2 P}{\sqrt{3}(P^2 + Q^2)}; \quad R_2 = \frac{U^2 Q}{\sqrt{3}(P^2 + Q^2)}$$

По полученным из опытов значениям X_2 и R_2 , рассчитанным для каждого измеренного I_{k2} , строят их зависимости от тока. Для определения ненасыщенных значений X_2 и R_2 следует экстраполировать полученные зависимости на значение $\sqrt{3}I_n$, равное току короткого замыкания.

В опыте обратного чередования фаз испытываемая машина с замкнутой накоротко обмоткой возбуждения, вращающаяся с номинальной частотой, питается от постороннего источника пониженного симметричного напряжения, равного $(0,02 \dots 0,2)U_{ном}$ с обратным чередованием фаз, т. е. в режиме электромагнитного тормоза со скольжением, равным двум.

При этом измеряют напряжение и ток во всех трех фазах и подведенную мощность.

Полное, активное и индуктивное сопротивления обратной последовательности находят по формулам:

$$Z_2 = \frac{U}{\sqrt{3}I}; \quad R_2 = \frac{P}{3I^2}; \quad X_2 = \sqrt{Z_2^2 - R_2^2}, \quad (5.44)$$

где U — среднее приложенное напряжение, В; P — мощность, подведенная к обмотке якоря, В·А; I — средний измеренный ток, А.

Индуктивное и активное сопротивления определяют для каждого значения приложенного напряжения, а затем строят их зависимость от тока. Если опытным путем определены значения X''_d и X''_q , то индуктивное сопротивление обратной последовательности равно

$$X_2 = \frac{X''_d + X''_q}{2}$$

Индуктивное и активное сопротивления нулевой последовательности. Эти сопротивления определяют из опытов однофазного питания трех фаз испытываемой машины и установившегося короткого замыкания двух фаз на нейтраль.

В опыте однофазного питания трех фаз машина вращается с номинальной частотой (или близкой к номинальной) при замкнутой накоротко обмотке возбуждения. При этом все три фазы обмотки якоря соединяют последовательно в разомкнутый треугольник.

Измеряют напряжение U , ток I и мощность P при нескольких значениях приложенного напряжения. Напряжения выбирают такими, чтобы ток в обмотке якоря не превышал номинального значения.

Можно определять индуктивное и активное сопротивления нулевой последовательности и при параллельном соединении фаз обмотки.

При последовательном соединении фаз обмотки активное сопротивление R_0 нулевой последовательности, а также полное сопротивление Z_0 можно рассчитать по формулам (5.44), заменив Z_2 и R_2 соответственно на Z_0 и R_0 . При параллельном соединении фаз обмотки

$$R_0 = \frac{3P}{I^2}; \quad Z_0 = \frac{3U}{I}$$

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности находят по формуле (5.44), в которой X_2 следует заменить на X_0 , а Z_2 и R_2 соответственно на Z_0 и R_0 .

Для каждого значения приложенного напряжения определяют X_0 и R_0 и строят их зависимость от тока.

В опыте установившегося короткого замыкания двух фаз на нейтраль испытываемая машина вращается с номинальной частотой, обмотка якоря соединяется в звезду, а две фазы замыкают на нейтраль (рис. 5.71). Машину возбуждают и измеряют напряжение между выводом разомкнутой фазы и нейтралью U , ток, протекающий в перемычке от замкнутых накоротко выводов к нейтрали I_0 , и мощность P . Измерения проводят при нескольких значениях тока в нейтрали. Значение тока и длительность проведения опыта ограничивают условиями нагрева ротора или возможностью появления недопустимых вибраций. Индуктивное и активное сопротивления нулевой последовательности рассчитывают по следующим формулам:

$$X_0 = \frac{\sqrt{U^2 I_0^2 - P^2}}{\sqrt{3} I_0^2}; \quad R_0 = \frac{P}{I_0^2}$$

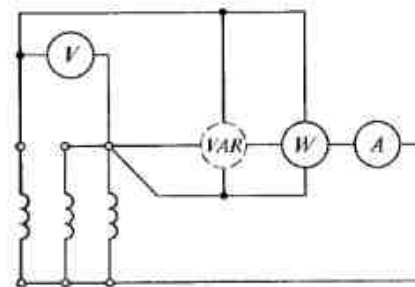


Рис. 5.71. Схема для проведения опыта установившегося короткого замыкания двух фаз на нейтраль: V — вольтметр; A — амперметр; W — ваттметр; VAR — измеритель реактивной мощности

При существенном отклонении кривых напряжения и тока от практически синусоидальной формы при расчете следует учитывать значения основных гармонических. Если при опыте измеряют реактивную мощность Q , то

$$\dot{X}_0 = \frac{U^2 Q}{P^2 + Q^2}; \quad R_0 = \frac{U^2 P}{P^2 + Q^2}.$$

По полученным из опытов значениям X_0 и R_0 , рассчитанным для каждого измеренного I_0 , строят их зависимости от тока. Ненайденное значение X_0 и R_0 можно получить экстраполяцией полученных зависимостей на значение тока в нейтрали, равного трехкратному номинальному току.

Индуктивное сопротивление рассеяния якоря. Это сопротивление X_s определяют при вынужденном вращении ротора и питании трех фаз обмотки якоря от постороннего источника напряжения номинальной частоты.

Измеряют приложенное линейное напряжение U , линейный ток I и подводимую мощность P .

По этим параметрам по формулам (5.44) рассчитывают индуктивное сопротивление фазы якоря X_{ca} , заменив в них индексы «2» на индексы «a».

Далее находят индуктивное сопротивление X_b обусловленное потоком на активной поверхности якоря, создаваемым обмоткой якоря в том пространстве, которое обычно занимает ротор. Для этого на активной поверхности статора помещают контрольную катушку, длина которой равна полной длине сердечника статора, а ширина — полюсному делению.

Активные стороны катушки укрепляют над клиньями пазов, а лобовые — оттягивают растяжками по радиусам к оси машины в плоскостях, ограничивающих пакет сердечника статора, для предохранения их от влияния потоков рассеяния вокруг лобовых частей обмотки.

К контрольной катушке присоединяют вольтметр с возможно большим внутренним сопротивлением. Индуктивное сопротивление, обусловленное потоком на активной поверхности якоря, равно

$$X_b = \frac{U_{кит} w k_{об}}{I w_{кит}},$$

где $U_{кит}$ — напряжение, измеренное на контрольной катушке; I — линейный ток; w — число последовательно соединенных витков одной фазы обмотки якоря; $k_{об}$ — обмоточный коэффициент обмотки якоря; $w_{кит}$ — число витков контрольной катушки.

При дробном числе пазов на полюс и фазу в якоря ширину контрольной катушки выбирают равной наибольшему целому числу пазов, заключенному в полюсном делении.

Тогда

$$X_b = \frac{U_{кит} w k_{об}}{I w_{кит} \sin\left(\frac{N \pi}{3q}\right)},$$

где N — наибольшее целое число пазов, заключенных в полюсном делении; q — дробное число пазов на полюс и фазу.

Искомое индуктивное сопротивление рассеяния рассчитывают по формуле

$$X_s = X_a - X_b.$$

Расчетное индуктивное сопротивление. Это сопротивление X_r определяют с помощью графических построений по характеристикам холостого хода, установившегося трехфазного короткого замыкания, и по точке A нагрузочной характеристики, соответствующей номинальным значениям напряжения и тока якоря в режиме перевозбуждения с коэффициентом мощности, близким к нулю (рис. 5.72).

Влево от точки A параллельно оси абсцисс откладывают отрезок AF , равный току возбуждения $I_{в.к}$ при номинальном токе якоря (по характеристике 1 установившегося трехфазного короткого замыкания).

Из точки F проводят линию параллельно начальной части характеристики 2 холостого хода до пересечения с последней в точке H .

Перпендикуляр из точки H на линию AF (отрезок HG) пропорционален падению напряжения U_{HG} на индуктивном сопротивлении X_r при номинальном токе якоря $I_{ном}$. Расчетное индуктивное сопротивление

$$X_r = \frac{HG}{\sqrt{3} I_{ном}}.$$

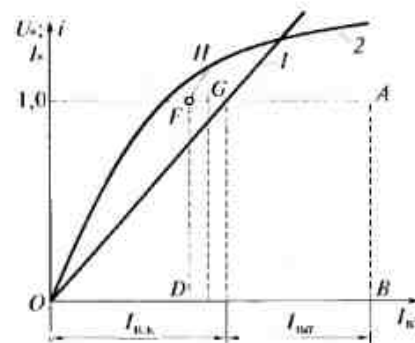


Рис. 5.72. Определение расчетного индуктивного сопротивления графическим методом:

1 — характеристика установившегося трехфазного короткого замыкания; 2 — характеристика холостого хода

Приближенно для машин с номинальной частотой до 100 Гц

$$X_r = aX_d.$$

Для машин с явновыраженными полюсами на роторе $a = 1$; для машин с неявновыраженными полюсами $a = 0,6 \dots 0,65$.

Переходная постоянная времени по продольной оси. Для расчета и анализа переходных процессов в синхронных машинах необходимо знать постоянные времени, определяемые экспериментально.

Переходную постоянную времени по продольной оси при разомкнутой обмотке якоря τ'_{d0} находят по данным опыта гашения поля при разомкнутой обмотке якоря, ударного возбуждения, восстановления напряжения и отключения питания.

Опыт гашения поля проводят на машине, приводимой во вращение с номинальной частотой; осуществляют внезапное замыкание накоротко обмотки возбуждения. Для ограничения тока короткого замыкания источника питания обмотки возбуждения рекомендуется последовательно с ним вводить добавочное сопротивление.

Опыт можно проводить при разомкнутой или замкнутой накоротко обмотке якоря.

Для определения переходной постоянной времени по продольной оси при разомкнутой обмотке якоря гашение поля должно проводиться при номинальном напряжении на выводах машины. Во время опыта осциллографируют напряжение якоря и ток в обмотке возбуждения или напряжение на кольцах. Напряжение якоря, соответствующее моменту начала гашения поля, принимают за исходное.

Разность напряжения якоря, полученного из осциллограммы и остаточного напряжения машины для различных моментов времени, строят на графике в полулогарифмических координатах. Время, в течение которого указанная разность напряжений уменьшится до 0,368 своего первичного значения, соответствует τ'_{d0} .

Опыт ударного возбуждения проводят на вращающейся с номинальной частотой машине, обмотку возбуждения которой внезапно подключают к цепи якоря, или предварительно возбужденного возбудителя, или другого источника, обеспечивающего стабильное напряжение на зажимах обмотки возбуждения. Напряжение источника выбирают таким, чтобы установившийся ток возбуждения соответствовал прямолинейной части характеристики холостого хода.

Обмотка якоря при опыте может быть разомкнутой или замкнутой накоротко. Для определения переходной постоянной времени по продольной оси при разомкнутой обмотке якоря необходимо осциллографировать напряжение и ток возбуждения и кроме того напряжение якоря. По осциллограмме определяют раз-

ность между установившимся и текущим значениями напряжения якоря и строят эту разность в функции времени в полулогарифмических координатах.

Прямолинейную часть этой кривой экстраполируют на ось ординат, определяя таким образом начальное значение переходной составляющей. Время, в течение которого переходная составляющая уменьшится до 0,368 своего первоначального значения, соответствует τ'_{d0} .

Искомое значение τ'_{d0} можно определить также по изменению тока возбуждения.

Для этого по характеристике холостого хода следует определить ток возбуждения, соответствующий установившемуся значению напряжения якоря, и отложить в полулогарифмических координатах разность между этим током и текущими значениями тока возбуждения в функции времени.

Переходную постоянную времени по продольной оси при разомкнутой обмотке якоря можно определить и из опыта восстановления напряжения.

Время, в течение которого переходная составляющая напряжения ΔU (рис. 5.73) уменьшается до 0,368 своего первоначального значения, соответствует τ'_{d0} .

При использовании опыта отключения питания при продольном положении ротора напряжение якоря, определенное по осциллограмме (за вычетом остаточного напряжения $U(\infty)$), строят в функции времени (см. рис. 5.73).

Прямолинейную часть полученной кривой I экстраполируют на ось ординат и определяют начальное значение переходной составляющей. Время, в течение которого переходная составляющая уменьшается до 0,368 своего первоначального значения, соответствует τ'_{d0} .

Если из предыдущих опытов определены x_d , x'_d и τ'_{d0} , то

$$\tau'_{d0} = \frac{\tau'_d X_d}{X'_d}.$$

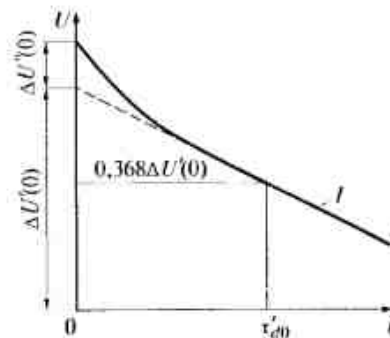


Рис. 5.73. Определение переходной постоянной времени по продольной оси методом восстановления напряжения:

I — напряжение якоря (за вычетом остаточного напряжения)

Переходную постоянную времени по поперечной оси при разомкнутой обмотке якоря τ'_{d0} определяют из опыта отключения питания при поперечном положении ротора.

Переходную постоянную времени по продольной оси при замкнутой накоротко обмотке якоря τ'_d можно найти по данным опытов внезапного трехфазного короткого замыкания и гашения поля при замкнутой накоротко обмотке якоря, а также из опыта ударного возбуждения.

При всех опытах осциллографируют соответствующие токи. Переходную постоянную времени по продольной оси при замкнутой накоротко обмотке якоря определяют по разности между установившимся и переменным значениями тока якоря. Время, в течение которого разность токов уменьшается до значения, равного 0,368 своего первоначального значения, соответствует τ'_d .

Если опытным путем определены τ'_{d0} , X'_d и $X'_{d\sigma}$ то

$$\tau'_{d0} = \frac{\tau'_d X'_d}{X'_d}$$

Сверхпереходная постоянная времени по продольной оси. Сверхпереходную постоянную времени по продольной оси при разомкнутой обмотке якоря τ''_{d0} определяют из опыта восстановления напряжения (см. рис. 5.69).

Время, в течение которого сверхпереходная составляющая напряжения $\Delta U''$ уменьшается до 0,368 своего первоначального значения, соответствует τ''_{d0} .

Если опытным путем были определены X'_d , X''_d и сверхпереходная постоянная времени по продольной оси при замкнутой накоротко обмотке якоря τ''_d то

$$\tau''_{d0} = \frac{\tau''_d X'_d}{X''_d}$$

Сверхпереходную постоянную времени по продольной оси при замкнутой накоротко обмотке якоря τ''_d находят из опыта внезапного трехфазного короткого замыкания на выводах машины, как при определении переходного индуктивного сопротивления по продольной оси.

Постоянные времени апериодической составляющей тока якоря, контура возбуждения и успокоительного контура. Из опыта по затуханию периодической составляющей тока в цепи возбуждения определяют постоянную времени апериодической составляющей тока якоря τ_d .

Время, в течение которого периодическая составляющая тока в цепи возбуждения уменьшится до 0,368 своего первоначального значения, соответствует τ_d .

Постоянные времени контура возбуждения и успокоительного контура по продольной оси находят расчетно-экспериментальным методом из опытов гашения поля:

при холостом ходе с напряжением, соответствующим линейной части характеристики холостого хода, и внезапном коротком замыкании обмотки возбуждения;

холостом ходе с напряжением, соответствующим линейной части характеристики холостого хода, и внезапном замыкании обмотки возбуждения на добавочный резистор;

коротком замыкании с номинальным током и внезапном коротком замыкании обмотки возбуждения;

коротком замыкании с номинальным током и внезапном коротком замыкании обмотки возбуждения на добавочный резистор.

В первых двух опытах осциллографируют затухание напряжения якоря и определяют переходные постоянные времени по продольной оси при разомкнутой обмотке якоря без добавочного резистора в цепи возбуждения τ_{d0} и с добавочным резистором τ'_{d0r} . В третьем и четвертом опытах осциллографируют затухание тока якоря и определяют постоянные времени по продольной оси при замкнутой накоротко обмотке якоря без добавочного резистора в цепи возбуждения τ'_d и с добавочным резистором τ'_{dr} . Кроме того, во всех четырех опытах осциллографируют затухание тока в обмотке возбуждения для определения сверхпереходных постоянных времени: τ''_{d0} , τ''_{d0r} , τ''_d и τ''_{dr} (обозначение индексов аналогично обозначению для переходных постоянных времени).

Постоянные времени контура возбуждения τ_{nd} и успокоительного контура τ_{1d} по продольной оси при замкнутой накоротко обмотке якоря можно найти по выражениям:

$$\tau_{nd} = \frac{(1+a)[(\tau'_d - \tau'_{dr}) + (\tau''_d - \tau''_{dr})]}{a},$$

$$\tau_{1d} = \frac{(\tau'_d - \tau'_{dr}) - [(\tau'_d - \tau'_{dr}) + (\tau''_d - \tau''_{dr})]}{a},$$

где a — кратность добавочного сопротивления, определяемая отношением сопротивления добавочного резистора к сопротивлению обмотки возбуждения.

По аналогичным формулам определяют постоянные времени контура возбуждения τ_{nd0} и успокоительного контура τ_{1d0} при разомкнутой обмотке.

Пусковые токи и вращающие моменты синхронных двигателей и синхронных компенсаторов, не имеющих пусковых двигателей. Методы их определения в основном такие же, как применяемые в асинхронных двигателях.

Рассмотрим некоторые дополнительные требования и условия при определении таких параметров в синхронных двигателях и компенсаторах.

Обмотку возбуждения следует замыкать накоротко или на резистор.

Для двигателей мощностью 100 кВт и ниже наибольшее подводимое напряжение составляет $U_{\max} = (1 \pm 0,1)U_{\text{ном}}$, для двигателей и синхронных компенсаторов большей мощности — $U_{\max} \geq 0,5U_{\text{ном}}$. В этом случае начальные пусковые ток $I_{\text{к.ном}}$ и момент $M_{\text{к.ном}}$ определяют приведением к номинальному напряжению:

$$I_{\text{к.ном}} = \frac{I_{\text{к.ном}}(U_{\text{ном}} - U_{\text{к}})}{U_{\text{пуск}} - U_{\text{к}}}; \quad M_{\text{к.ном}} = M_{\text{к.пуск}}(I_{\text{к.ном}}/I_{\text{к.пуск}})^2.$$

где $U_{\text{к}}$ — напряжение, соответствующее отрезку, отсекаемому на оси абсцисс касательной 1 к кривой 2 , изображающей зависимость тока от напряжения, В (рис. 5.74); $I_{\text{к.пуск}}$ — наибольший ток при испытании, соответствующий $U_{\text{пуск}}$; $M_{\text{к.пуск}}$ — вращающий момент, измеренный или рассчитанный при напряжении $U_{\text{пуск}}$, Н·м.

Начальные пусковые ток и момент можно определить из опыта пуска ненагруженного двигателя.

Для этого испытуемую машину приводят во вращение в направлении, противоположном основному, с частотой 0,2...0,3 номинальной, включают ее в сеть и регистрируют с помощью осциллографа процессы разгона; допускается производить пуск из неподвижного состояния.

Для приближения получаемой из опыта пуска динамической моментной характеристики к статической длительность разгона увеличивают за счет присоединения к двигателю дополнительной маховой массы.

Если прямая тарировка записи динамического момента или углового ускорения невозможна, то допускается определять масштаб момента по изменению частоты вращения.

Для этого необходимо на осциллограмме пуска (рис. 5.75) выбрать близкий к прямолинейному участок кривой M_d так, чтобы за соответствующий ему отрезок времени Δt приращение частоты вращения Δn составило не менее 20% синхронной частоты, и вычис-

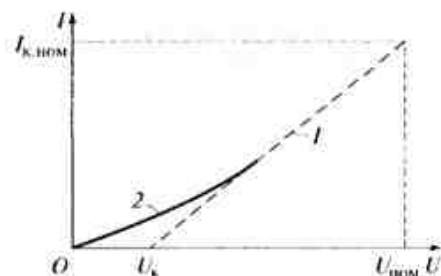


Рис. 5.74. Определение начального пускового тока и начального пускового момента:
 1 — касательная к кривой $(2) I = f(U)$

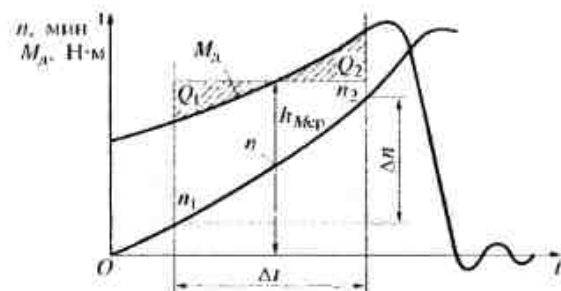


Рис. 5.75. Определение масштаба кривой динамического момента

лить на этом участке среднее значение динамического момента (Н·м):

$$M_{\text{д.ср}} = \frac{\pi J \Delta n}{30 \Delta t},$$

где J — момент инерции ротора и дополнительных маховых масс.

Затем следует найти ординату кривой $M_d(h_{\text{Мср}})$, соответствующую среднему моменту $M_{\text{д.ср}}$ на участке Δt (по равенству площадей фигур $Q_1 = Q_2$), и определить масштаб (Н·м/мм) кривой динамического момента:

$$m_M = \frac{M_{\text{д.ср}}}{h_{\text{Мср}}}.$$

Минимальный вращающий момент, развиваемый двигателем в процессе асинхронного пуска, определяют способами, изложенными в подразд. 4.19. Эти же методы пригодны для определения номинального входного момента синхронного двигателя, который определяют при частоте вращения, равной 0,95 синхронной ($s = 0,05$).

Максимальный вращающий момент явнополюсных и неявнополюсных синхронных машин обычно определяют расчетом при номинальном напряжении якоря, частоты и тока возбуждения.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют способы возбуждения синхронных машин?
2. Как осуществляется охлаждение синхронных генераторов?
3. От чего зависит реакция якоря синхронной машины?
4. Как ОКЗ влияет на свойства синхронного генератора?
5. Какие потери возникают в синхронной машине?
6. В чем заключается синхронизация синхронного генератора?
7. Чем опасно внезапное короткое замыкание для синхронного генератора?
8. Каким образом регулируют активную и реактивную мощности синхронной машины?

6.1. Назначение машин постоянного тока. Типы машин

Возможность создания двигателя постоянного тока была впервые показана М. Фарадеем в 1821 г. В 1834 г. Б. Якоби был создан двигатель постоянного тока с электромагнитным возбуждением. В 1838 г. им был построен более мощный электродвигатель, который использовался для привода гребного винта речного катера. Первыми создателями коллекторных машин постоянного тока были Г. Феррарисом и В. Сименсом. Значительное развитие теория электрических машин постоянного тока получила в трудах Д. Лачинова.

В XX в. продолжалось развитие теории и совершенствование конструкции машин постоянного тока. Большое внимание обращалось на повышение надежности этих машин путем улучшения коммутации.

Машины постоянного тока используют в электрических установках в качестве генераторов и двигателей. Их мощность колеблется от долей киловатта до 10 000 кВт и выше. Напряжение не превышает обычно нескольких тысяч вольт, хотя в некоторых специальных типах машин напряжение доходит до 30 кВ и выше. Наибольшее распространение получили машины, напряжение которых не превышает 1 000 В. Частота вращения машин постоянного тока колеблется в широких пределах — от нескольких десятков до нескольких тысяч оборотов в минуту. У некоторых машин специального назначения частота вращения доходит до нескольких десятков тысяч оборотов в минуту.

Области применения машин постоянного тока весьма разнообразны. Генераторы постоянного тока находят применение в промышленности для питания электропривода постоянного тока, в установках проводной и радиосвязи, авто- и авиатранспорте. Двигатели постоянного тока используют в электроприводах, требующих широкого, плавного и экономичного регулирования частоты вращения, высоких перегрузочных, пусковых и тормозных моментов, главным образом в металлообрабатывающих станках, бумагоделательных машинах, в текстильной, резиновой, полиграфической промышленности, вспомогательных механизмах металлургической промышленности и др.

Конструкции двигателей постоянного тока сложнее, а их стоимость выше, чем асинхронных двигателей, однако благодаря указанным свойствам их удельный вес в общем выпуске электрических машин постоянно повышается. Это обусловлено развитием и широким внедрением автоматизированного электропривода, а также освоением тиристорных устройств, позволяющих осуществлять питание двигателей постоянного тока от сети переменного тока. Вместе с тем развитие статических преобразователей влечет за собой соответствующее сокращение выпуска генераторов постоянного тока.

Выпускаемая в России единая серия машин постоянного тока подразделяется на два основных ряда: серия 2П с высотой оси вращения $h = 90 \dots 315$ мм (мощностью до 200 кВт) и серия П2 с $h = 355 \dots 630$ мм (мощностью свыше 200 кВт).

Серия 2П. Серия охватывает следующие исполнения по степени защиты от внешних воздействий и по способу охлаждения: защищенное исполнение (IP22) с самовентиляцией (IC01) при $h = 90 \dots 315$ мм; защищенное исполнение (IP22) с независимой вентиляцией от пристроенного электровентилятора (IC06) при $h = 132 \dots 200$; закрытое исполнение (IP44) с наружным обдувом от пристроенного электровентилятора (IC0641) при $h = 132 \dots 200$ мм; закрытое исполнение (IP44) с естественным охлаждением (IC0041) при $h = 90 \dots 200$ мм.

Двигатели со степенью защиты IP22 допускают регулирование частоты вращения (ослаблением поля главных полюсов) сверх номинальной (при постоянной мощности на валу) в пределах от 1 : 1,15 до 1 : 4 (в зависимости от типоразмера и номинальной частоты вращения). Двигатели с независимой вентиляцией допускают регулирование частоты вращения ниже номинальной до 3 мин⁻¹ при постоянном моменте вращения на валу; у остальных двигателей при уменьшении частоты вращения момент вращения должен снижаться во избежание недопустимого превышения температуры.

Двигатели имеют массивную станину и допускают работу при питании от статических преобразователей. В зависимости от схемы выпрямления номинальная мощность и диапазон регулирования частоты вращения могут снижаться. Двигатели изготавливают на номинальные напряжения 110 и 220 В (при мощности до 7,5 кВт), 220 и 440 В (при мощности свыше 7,5 кВт), генераторы — на 115, 230 (при мощности до 7,5 кВт), 230 и 460 В (при мощности более 7,5 кВт). Машины со степенью защиты IP22 при $h = 90 \dots 200$ мм выполняют с изоляцией класса нагревостойкости В, все остальные машины — с изоляцией класса F. Общие технические условия на машины серии 2П регламентированы стандартом.

Серия П2. К двигателям этой серии относятся двигатели защищенного исполнения (IP23) с независимым охлаждением, осуществляемым пристроенным зависимым (IC13) или независимым (IC17) устройством, а также генераторы защищенного исполне-

ния (IP23) с самовентиляцией (IC01) или с независимым охлаждением IC13.

Двигатели допускают регулирование частоты вращения ослаблением поля главных полюсов свыше номинальной (при постоянной мощности на валу) в пределах от 1:1,1 до 1:5, в зависимости от величины типоразмера и номинальной частоты вращения и ниже номинальной (при постоянном моменте вращения на валу). Двигатели имеют два исполнения: с массивной или шихтованной станиной; последняя обеспечивает работу двигателей без снижения номинальной мощности при питании от статических преобразователей. Машины этой серии предназначены для работы в относительно тяжелых условиях при больших перегрузочных, пусковых и тормозных моментах, поэтому выполняются с компенсационной обмоткой.

Двигатели изготавливают на номинальные напряжения 440 (при мощности до 500 кВт включительно) и 600 В (при большей мощности); генераторы на номинальные напряжения 460 (до 500 кВт включительно) и 660 В (при большей мощности). Машины выполняются с изоляцией класса нагревостойкости F. Технические условия на двигатели серии П2 регламентированы стандартом.

Серия П. Наряду с единичными сериями 2П и П2 продолжают изготавливать машины серии П мощностью от 0,3 до 200 кВт с высотами оси вращения $h = 112...400$ мм. В серии П предусмотрены следующие исполнения по степени защиты и способу охлаждения: защищенное исполнение (IP22) с самовентиляцией (IC01) при $h = 112...400$ мм; закрытое исполнение (IP44) с наружным обдувом от вентилятора (IC0141), расположенного на валу двигателя, при $h = 112...160$ мм; закрытое исполнение (IP44) с пристроенным воздушным охлаждением (IC0161) при $h = 180...400$; закрытое исполнение (IP44) с естественным охлаждением (IC0041) при $h = 112...280$ мм.

Генераторы изготавливают защищенными (IP22) с самовентиляцией (IC01) при $h = 140...400$ мм. Двигатели предназначены для работы при номинальном напряжении 110 (для мощности до 55 кВт включительно), 220 (во всем диапазоне мощностей) и 440 В (при мощности 1,5 кВт и выше); генераторы — при номинальном напряжении 115 (при мощности до 90 кВт включительно), 230 (во всем диапазоне мощностей) и 460 В (при мощности 2,8 кВт и выше). Машины со степенью защиты IP22 выполняются с изоляцией класса нагревостойкости В (при $h = 112...255$ мм); остальные машины — с классом F. Станины в машинах серии П изготавливают монолитными.

6.2. Принцип работы машин постоянного тока

Машина постоянного тока представляет собой, по существу, машину переменного тока со специальным узлом — коллектором, который при определенных условиях выпрямляет переменный ток

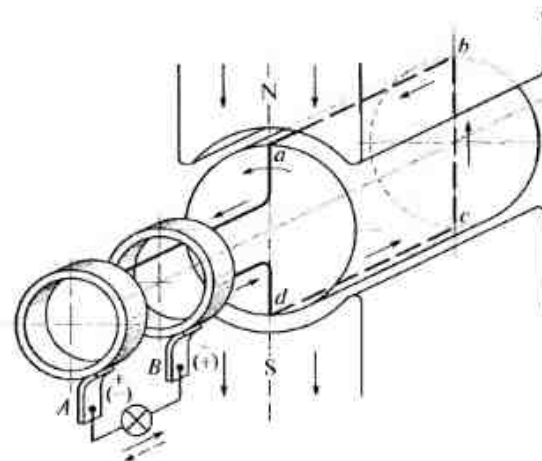


Рис. 6.1. Схема работы машины переменного тока:

A, B — щетки; N, S — неподвижные полюса; ab—cd — виток обмотки

в постоянный. Поэтому рассмотрим сначала работу простейшей машины переменного тока. На рис. 6.1 показаны два неподвижных полюса N и S, создающих постоянный магнитный поток, линии которого направлены от северного полюса N к южному S. В проем статора между полюсами вращается якорь. На поверхности якоря в диаметральной плоскости уложен виток $ab—cd$; концы витка присоединены к двум кольцам, насаженным на вал и вращающимся с той же угловой частотой, что и якорь; на кольца наложены неподвижные щетки A и B, к которым присоединяется внешняя цепь.

Будем считать, что якорь машины приводится во вращение первичным двигателем, например паротурбиной, с некоторой постоянной частотой вращения против часовой стрелки. Поскольку проводники ab и cd находятся в одинаковых условиях — один относительно полюса N, другой — S, — то достаточно иметь в виду только один из проводников, например проводник ab . Мгновенное значение ЭДС, индуцируемой в нем при вращении якоря, определяется по закону электромагнитной индукции

$$e = VIB_s, \quad (6.1)$$

где V — скорость движения проводника относительно магнитного поля; l — длина активной части проводника, т.е. части проводника, пересекающей линии магнитного поля; B_s — магнитная индукция (в том месте, где в данный момент находится проводник).

Поскольку значения V и l постоянны, то формулу (6.1) можно записать в следующем виде:

$$e = \text{const} B_s,$$

т.е. характер изменения ЭДС в проводнике определяется характером распределения магнитной индукции под полюсом.

Условимся называть линию, которая проходит через центр якоря посредине между полюсами N и S, *геометрической нейтралью*, а часть окружности якоря, соответствующую одному полюсу, — *полюсным делением*. На рис. 6.1 показаны два полюсных деления — одно соответствует северному полюсу, а другое — южному.

Будем считать, что магнитная индукция распределена под полюсами N и S синусоидально. В этом случае ЭДС, индуцируемая в проводнике при вращении якоря, изменяется во времени тоже синусоидально. Чтобы определить направление этой ЭДС, можно воспользоваться правилом правой руки, из которого следует, что когда проводник проходит под северным полюсом, то в нем индуцируется ЭДС, направленная к нам из-за плоскости чертежа; а когда он проходит под южным полюсом, то в обратном направлении. Таким образом, в рассматриваемом проводнике индуцируется переменная во времени ЭДС, изменяющая свое направление 2 раза за один оборот якоря. Время T , в течение которого происходит одно полное изменение ЭДС, называется *периодом ЭДС*. Число периодов за 1 с называется *частотой ЭДС*. В общем случае, если машина имеет p пар полюсов, частота индуцируемой ЭДС определяется формулой

$$f = pn/60, \quad (6.2)$$

где n — частота вращения якоря, мин^{-1} .

На рис. 6.1 видно, что каждая из щеток соединена через кольцо только с каким-нибудь одним проводником, щетка A — с проводником ab , а щетка B — с проводником cd . Следовательно, на зажимах внешней цепи появляется переменное во времени напряжение и по ней потечет переменный ток.

Чтобы получить машину, по внешней цепи которой течет выпрямленный ток, устанавливают *коллектор*, принцип действия которого состоит в следующем. Концы витка $ab-cd$ присоединяют к двум медным сегментам или *пластинам коллектора* (рис. 6.2), изолированным друг от друга и от вала и вращающимся с угловой частотой якоря. На пластины коллектора наложены неподвижные в пространстве щетки A и B, к которым присоединена внешняя цепь.

Положение щеток A и B на коллекторе имеет существенное значение. Чтобы добиться наилучших результатов, нужно поставить щетки так, чтобы они переходили с одной пластины на другую в тот момент, когда ЭДС, индуцируемая в витке, равна нулю. Тогда при вращении якоря в витке $ab-cd$ по-прежнему будет индуцироваться переменная ЭДС, но каждая из щеток будет соприкасаться только с той коллекторной пластиной и соответственно с тем из проводников, который находится под данным полюсом.

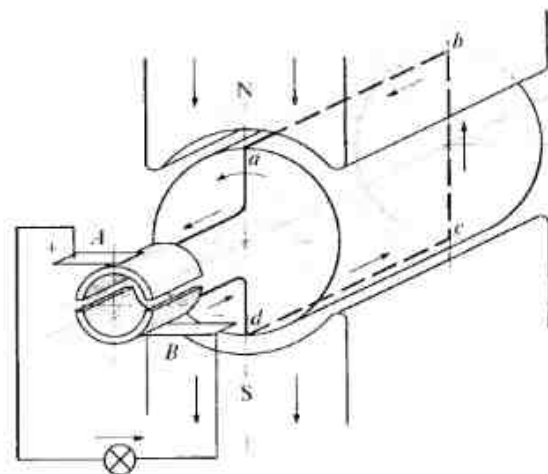


Рис. 6.2. Схема работы машины постоянного тока:

A, B — щетки; N, S — неподвижные полюса; $ab-cd$ — виток обмотки

Например, щетка A соприкасается всегда только с той коллекторной пластиной, с которой соединен проводник, находящийся под северным полюсом; щетка B соединяется только с тем из проводников, который находится под южным полюсом. Отсюда следует, что по внешнему участку ток всегда течет в одном направлении, а именно: от щетки A к щетке B; другими словами, происходит выпрямление переменного тока, индуцируемого в витке $ab-cd$, в пульсирующий ток во внешнем участке цепи. Если машина приводится во вращение посторонним двигателем, т.е. работает генератором, то щетка A, от которой ток отводится во внешнюю цепь, считается положительной и обозначается знаком «+», а щетка B, через которую ток поступает в машину, считается отрицательной и обозначается знаком «-».

Пульсации ЭДС происходят от наибольшего значения до нуля. Чтобы ее сгладить, на якоре укладывают несколько витков на одинаковом расстоянии друг от друга — например, четыре витка под углом 90° каждый относительно соседнего — и присоединяют их к четырем пластинам коллектора (рис. 6.3, a). Тогда выпрямленные полуволны ЭДС этих витков будут смещены каждая относительно соседней на 90° (рис. 6.3, б). Результирующая ЭДС пульсирует в значительно меньших пределах (толстая линия на рис. 6.3, б).

Обмотка якоря выполняется замкнутой, симметричной (рис. 6.4, б). При отсутствии внешней нагрузки ток по обмотке не проходит, так как ЭДС, индуцируемые в различных частях обмотки, взаимно компенсируются.

Если щетки, осуществляющие скользящий контакт с обмоткой якоря, расположить на геометрической нейтрали, то при

отсутствии внешней нагрузки к щеткам прикладывается напряжение U , равное ЭДС E , индуцированной в каждой из половин обмоток. Это напряжение практически неизменно, хотя и имеет некоторую переменную составляющую, обусловленную изменением положения проводников в пространстве. При большом количестве проводников пульсации напряжения весьма незначительны.

При подключении к щеткам сопротивления нагрузки R через обмотку якоря проходит постоянный ток I_a , направление которого определяется направлением ЭДС E . В обмотке якоря ток I_a разветвляется и проходит по двум параллельным ветвям (токи i_a).

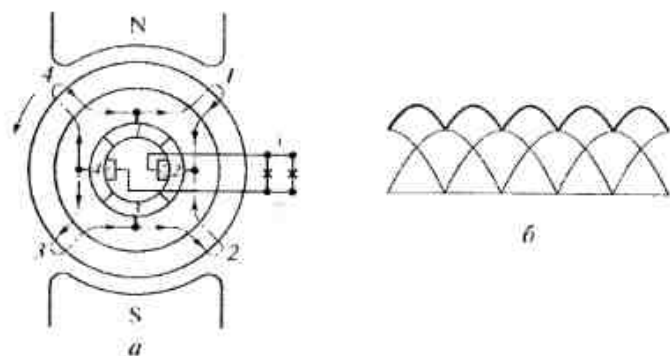


Рис. 6.3. Выпрямление ЭДС:

a — схема машины; b — кривая ЭДС; $1...4$ — проводники.

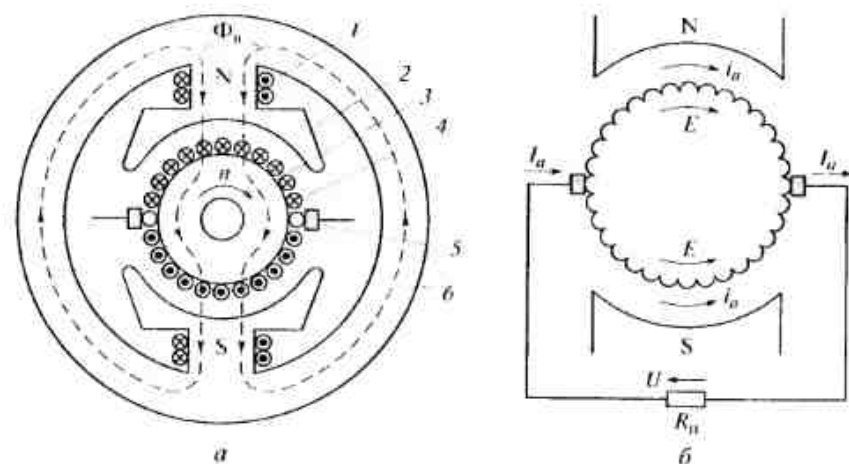


Рис. 6.4. Схема двухполюсной машины постоянного тока и эквивалентная схема ее обмотки:

a — схема машины; b — схема обмотки; 1 — обмотка возбуждения; 2 — главные полюсы; 3 — якорь; 4 — обмотка якоря; 5 — щетки; 6 — статор.

Для обеспечения надежного токосъема щетки скользят не по проводникам обмотки якоря, а по коллектору, выполненному в виде цилиндра, который набирается из медных пластин, изолированных одна от другой. К каждой паре коллекторных пластин присоединяют часть обмотки якоря, состоящую из одного или нескольких витков; эту часть называют *секцией обмотки якоря*.

Если машина работает в генераторном режиме, то коллектор вместе со скользящими по его поверхности щетками является выпрямителем. В двигательном режиме, когда к якорю подводится питание от источника постоянного тока, коллектор со щетками можно рассматривать как преобразователь частоты, связывающий сеть постоянного тока с обмоткой, по проводникам которой проходит переменный ток.

Таким образом, главной особенностью машины постоянного тока является наличие коллектора и скользящего контакта между обмоткой якоря и внешней электрической цепью.

6.3. Конструкция машин постоянного тока

Активная часть машины постоянного тока состоит из трех основных частей: индуцирующей, предназначенной для создания потока возбуждения; индуцируемой, в которой происходит процесс преобразования энергии одного вида в другую (механической в электрическую или наоборот) и воздушного зазора между неподвижной и вращающейся частями машины.

Индукующая часть машины постоянного тока неподвижна, в нее входят *главные полюсы*, предназначенные для создания основного магнитного потока; *добавочные полюсы*, устанавливаемые между главными полюсами, служащие для улучшения коммута-

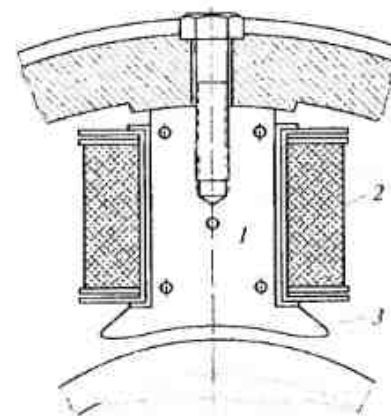


Рис. 6.5. Общий вид главного полюса:

1 — сердечник полюса; 2 — полюсная катушка; 3 — полюсный наконечник.

нии, и станина. Индуцируемая часть, называемая якорем, представляет собой цилиндрическое тело, расположенное на валу в пространстве между полюсами. Якорь состоит из зубчатого *сердечника*, *обмотки якоря* и *коллектора*. Рассмотрим главные конструктивные элементы машины постоянного тока.

Главные полюса. Главный полюс (рис. 6.5) состоит из сердечника 1, обычно набираемого из листовой электротехнической стали толщиной 0,5...1 мм, и полюсной катушки 2 (надетой на сердечник), по которой проходит ток возбуждения. Со стороны, обращенной к якорю, сердечник имеет полюсный наконечник 3. Край полюсного наконечника сканивают таким образом, чтобы распределение магнитного потока под полюсом было как можно более близким к синусоидальному. Полюсный наконечник служит также для улучшения крепления катушки, надеваемой на сердечник полюса. На рис. 6.5 показан один из возможных способов изоляции полюсной катушки от сердечника полюса. Катушка надевается на гильзу из изолирующего материала и закрепляется на специальном каркасе, расположенном на сердечнике. Для улучшения охлаждения катушку часто делит по высоте на две или несколько частей, между которыми проходят вентиляционные каналы. Крайние листы полюсов выполняют утолщенными (путем точечной сварки нескольких листов обычной толщины). При штамповке в листах полюсов предусматривают отверстия для шпилек. Собранный из отдельных листов полюс прессуют и закрепляют стальными шпильками и втулками (не менее четырех). К монолитной станине полюса крепят болтами. В машинах с компенсационной обмоткой в наконечниках главных полюсов предусматривают пазы для ее размещения.

Добавочные полюса. Добавочный полюс, как и главный, состоит из сердечника 1, оканчивающегося полюсным наконечником, и намотанной на сердечник катушки 2 (рис. 6.6). Добавочные полюса устанавливают по линии геометрической нейтрали между главными полюсами и прикрепляют к ядру болтами. Сердечники добавочных полюсов, как правило, изготавливают из листовой электротехнической стали.

Наконечники добавочных полюсов машин с $h \leq 315$ мм шире сердечников, образуемые при этом боковые выступы служат опорой для катушек полюсов. В машинах с $h > 315$ мм необходимость в таких выступах отпадает, так как катушки крепятся к сердечникам полюсов хомутами; сердечники добавочных полюсов этих машин выполняют из листов Т-образной формы (для уменьшения магнитной индукции в наиболее насыщенной части полюсов и для повышения механической прочности их крепления).

Между полюсами и станиной располагают прокладки из листовой стали, изменением количества которых регулируют величину воздушного зазора между якорем и полюсами. В добавоч-

ных полюсах машин с $h > 315$ мм регулирование может осуществляться также прокладками из немагнитных материалов. В машинах с $h \leq 315$ мм и с шихтованной станиной полюсы могут входить в единый блок с сердечником станины либо привинчиваться к сердечнику.

Обмотки главных и добавочных полюсов. В машинах с $h \leq 200$ мм сердечники полюсов изолируются полимерными пленками, образуемыми методом напыления. Суть метода состоит в следующем. Порошкообразная терморезистивная смола (например, эпоксидная) под давлением воздуха поступает в камеру, осаждается на предварительно нагретой поверхности сердечника полюса и затвердевает. Процесс протекает с образованием пленки толщиной около 1 мм. Пленка обладает высокими электроизоляционными свойствами и механической прочностью. Для повышения надежности такой изоляции целесообразно перед напылением закруглить кромки неизолированного сердечника.

На каждом полюсе — главном или добавочном — располагают одну катушку; на главном полюсе дополнительно размещают катушку последовательной стабилизирующей обмотки двигателя или компаундной обмотки генератора. Изоляция катушек полюсов состоит из тонкостенного каркаса, изготовляемого из лакотканеэпоксидной смолы и стеклянной ленты.

В больших машинах с $h = 225...315$ мм катушки параллельной обмотки главных полюсов изготавливают в виде одной шайбы (иногда для увеличения поверхности охлаждения — в виде двух шайб) на полюсе, между которыми устанавливают металлическую скобу; при необходимости на полюсе может также располагаться дополнительная последовательная обмотка возбуждения. Изоляция катушек параллельной и последовательной обмоток состоит из изоляционного каркаса толщиной 2 мм и стеклотенты. Катушки добавочных полюсов в таких машинах выполняют из неизолированной шинной меди, гнутой на ребро. Материалом для изоляционных прокладок между витками катушек служит асбестовая бумага, пропитанная изоляционным лаком (для классов нагревостойкости изоляции В и F) или фенилоновая бумага (для класса Н).

В машинах, работающих в тяжелых условиях ($h \geq 355$ мм), применяют обмотки полюсов повышенной надежности. Изоляционные каркасы обмотки главных полюсов, а также крепежные детали изготавливают увеличенной толщины. В этих машинах катушки главных полюсов имеют большую поверхность охлаждения за счет вы-

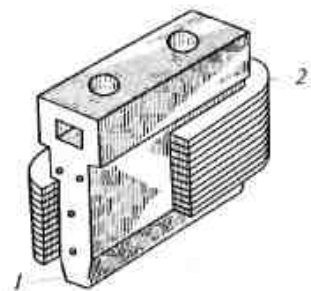


Рис. 6.6. Общий вид добавочного полюса:

1 — сердечник; 2 — полюсная катушка

полнения из отдельных (двух или трех) шайб. Обмотку добавочных полюсов выполняют из неизолированной меди, гнутой на ребро. Катушки крепят к полюсу металлическими хомутами.

При применении изоляции «Монолит» насаженные на сердечники полюсов изолированные катушки подвергают вакуумной пропитке терморезактивным компаундом таким образом, что образуется единый, монолитный блок полюс — катушка. При этом значительно улучшается теплоотдача катушек, а пропитка блоков полюс — катушка создает настолько прочное сцепление обмотки с сердечником полюса, что отпадает необходимость в применении крепящих деталей, в том числе металлических и изоляционных рамок. При использовании изоляции «Монолит» температура обмотки значительно понижается.

Компенсационная обмотка. Компенсационная обмотка располагается в пазах наконечников главных полюсов. Для стержневой обмотки пазы выполняют прямоугольными полузакрытыми. Стержни, изготовленные из неизолированной меди, изолируют, а затем вставляют в пазы с торца. Соединяют стержни медными дугами с помощью пайки; для соблюдения определенной дистанции между дугами устанавливают прокладки из стеклотекстолита, закрепляемые бандажами.

Для секционной обмотки пазы изготавливают прямоугольными открытыми, а секции крепят клиньями. Секционную обмотку выполняют, как и стержневую, из неизолированных проводов. Секции изготавливают намоткой на шаблонах с последующим изолированием.

Станина. Станиной называют неподвижную часть машины, к которой крепят основные и добавочные полюса и при помощи которой машина крепится к фундаменту. Часть станины, служащую для проведения магнитного потока основных и добавочных полюсов, называют *ярмом*. Станина делается монолитной или шихтованной. Монолитная станина имеет не только механическое назначение, но и одновременно является частью магнитопровода; поэтому ее изготавливают из стали с достаточно высокой магнитной проницаемостью. У машин меньшей мощности с высотой оси вращения $h = 80 \dots 200$ мм для создания монолитной станины обычно применяют отрезки цельнотянутых стальных труб, к которым приваривают опорные лапы. Такой способ снижает трудоемкость и стоимость. Для больших машин с $h = 225 \dots 315$ мм цилиндрическую часть станины делают из загнутого толстолистового проката, при этом (для обеспечения магнитной симметрии) продольный сварной шов цилиндра располагают по оси главных полюсов. К цилиндрической части приваривают опорные лапы.

В станинах предусматривают кольцевые центрирующие заточки, рым-болты или транспортные уши и наружные зажимы для

заземления корпуса и крепления таблички с техническими данными машины.

Коробку выводов у машин с $h = 80 \dots 200$ мм располагают на станине, а у машин с $h > 200$ мм — сбоку. Для повышения жесткости оболочки машин целесообразно укорачивать вылеты подшипниковых штов за счет удлинения станины, стремясь к дисковой форме штов. Тогда части станины, значительно выступающие за пределы длины сердечника якоря, могут выполняться с уменьшенной толщиной, особенно в тех местах, где должны располагаться люки для обслуживания коллектора и шеточного узла.

Шихтованные сердечники станин у машин с $h \leq 315$ мм выполняют набором круглых штампованных колец или сегментов из электротехнической стали. Сердечники скрепляют по наружной поверхности утопленными скобами и размещают в станине. Сердечники могут также изготавливаться из отштампованных листов, образующих цельный блок станины с сердечниками главных и добавочных полюсов; наконечники полюсов при этом изготавливают и скрепляют заклепками отдельно, а затем привинчивают к сердечникам. У машин с $h \geq 355$ мм шихтованные сердечники имеют восьмигранную форму.

Кроме полюсов к станине крепят подшипниковые шты, поддерживающие штиковые подшипники. Если диаметр шты превышает 1 м, то обычно используют стойковые подшипниковые узлы, устанавливаемые на фундаментной плите машины с помощью шариковых или роликовых подшипников. Стойковые подшипники чаще всего выполняются как подшипники скользящего трения, главным образом с кольцевой смазкой.

Якорь. Барабанные зубчатые якоря выполняют из листовой электротехнической стали. На рис. 6.7 показан сердечник якоря. С листов сердечника якоря после штамповки снимают заусенцы и покрывают изолирующим лаком. Листы набирают непосредственно на вал; при этом по торцам сердечника во избежание «распушения» располагают утопленные листы, образуемые точечной сваркой из нескольких листов толщиной 0,5 мм. Собранный сердечник якоря размещают между стальными нажимными шайбами, прес-

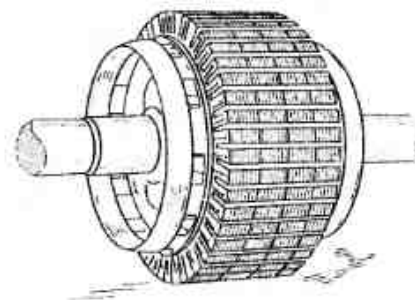


Рис. 6.7. Общий вид сердечника якоря машины постоянного тока

суют и закрепляют с одной стороны заплечиком вала, с другой — упорным кольцом, посаженным на вал с прессовой посадкой с нагревом.

Нажимные шайбы могут выполняться в виде обмоткодержателей с дополнительной опорой для лобовых частей обмотки. Обмоткодержатели — литые чугунные, а в больших машинах — стальные сварные. В небольших машинах применяют также опоры для лобовых частей в виде пластмассовых втулок.

Мягкие катушки двухслойной всынной обмотки якоря из круглых проводов изготавливают намоткой на специальных шаблонах, укладывают («высыпают») через шлиц в полуоткрытые пазы, выложенные корпусной изоляцией. Ширина пазов паза якоря должна обеспечивать достаточную технологичность укладки катушек. Для повышения механической прочности торцов корпусной изоляции ее края загибают на 180°. Между верхними и нижними сторонами катушек в пазах и в лобовых частях обмотки размещают изоляционные прокладки.

Для закрепления всынной обмотки от перемещения в радиальном направлении (вследствие действия центробежных сил) применяют клинья из стеклотекстолита полукруглого поперечного сечения, а в лобовых частях — бандажи. Бандажи выполняют из нетканой стеклотекстолитовой, состоящей из параллельно уложенных стеклонитей, которые пропитаны полиэфирным связующим.

Катушки жесткой двухслойной обмотки якоря из прямоугольного провода изготавливают на шаблонах, изолируют, опрессовывают и заклеивают в открытые пазы, выложенные корпусной изоляцией. Между верхними и нижними катушками в пазу размещают изоляционные прокладки из стеклотекстолита, а в лобовых частях — полосы из лакопеклоэлюдопиацета или гибкого миканита.

Обмотку в пазах крепят бандажами из стеклотекстолита или стальной проволоки, располагаемыми в кольцевых бандажных канавках сердечника якоря, поэтому по длине якоря предусматривают несколько канавок. На лобовые части обмотки накладывают бандажи.

Для больших машин ($h \geq 355$ мм), работающих в тяжелых условиях, применяют обмотку якоря повышенной надежности с усилением витковой изоляции путем применения прямоугольных проводов со стеклонряжей марок ПСД или ПСДК и дополнительного изолирования промежуточных секций в катушках стеклянкой лентой или полиамидной пленкой. Крепят обмотку в пазах клиньями из стеклотекстолита. На лобовые части обмотки накладывают бандажи из стеклотекстолита.

Применяемая в специальных машинах (тяговых, крановых, металлургических и др.) изоляция «Монолит» находит в настоящее время все большее распространение в машинах общего на-

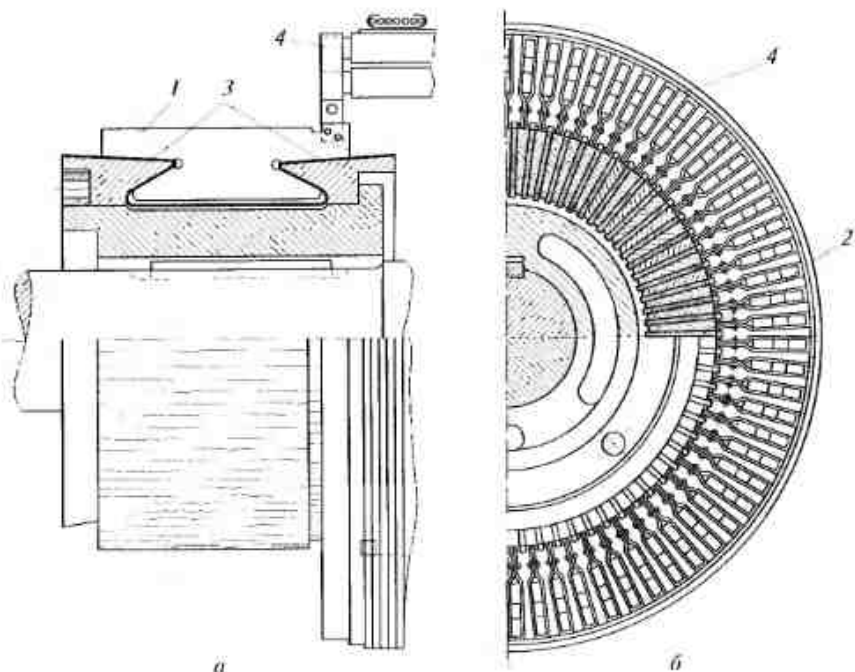


Рис. 6.8. Продольный (а) и поперечный (б) разрезы коллектора: 1 — коллекторная пластина; 2 — миканитовая прокладка; 3 — миканитовая буска; 4 — хомут

значения. Машины с изоляцией «Монолит» обладают высокой теплопроводностью и повышенной надежностью.

Коллектор. На рис. 6.8. изображены продольный и поперечный разрезы коллектора. Коллекторная пластина 1, являющаяся основным элементом коллектора, имеет форму «ласточкина хвоста». Коллекторные пластины изолируют друг от друга, чаще всего при помощи миканитовых прокладок 2, а от корпуса — при помощи миканитовых бусок 3. Коллекторная пластина вместе с изоляцией, отделяющей ее от соседней пластины, образует коллекторное деление. Соединение обмотки с коллекторными пластинами осуществляется хомутами 4, надеваемыми на концы секций и впаиваемыми в специально оставленные для этой цели концы пластин. Коллектор имеет геометрически правильную цилиндрическую форму.

У машин с $h \leq 200 \dots 250$ мм коллекторные пластины крепят пластмассой марки К6 или АГ-4с. При такой конструкции крепления коллекторные и изоляционные пластины штампуют по размеру, одновременно создавая в них «ласточкин хвосты» или кольцевые канавки для закрепления пластин в монолитный блок. Для

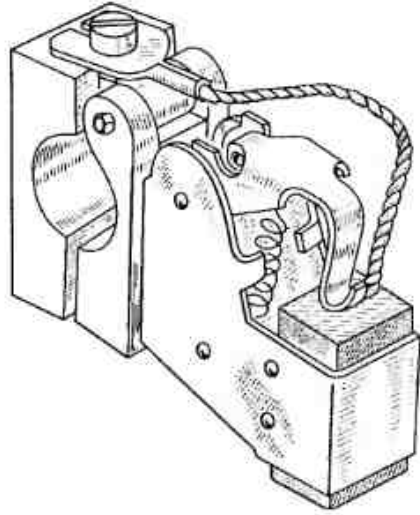


Рис. 6.9. Общий вид щеткодержателя со щетками

повышения механической прочности коллектора в «ласточкиных хвостах» или кольцевых канавках располагают стальные армирующие кольца. Кроме того, для обеспечения прессовой посадки при повторном насаживании коллектора на вал предусматривают запрессовку в центральную часть пластмассового корпуса стальной втулки. В коллекторных пластинах фрезеруют канавки, которые лудят оловянным припоем. В этих канавках располагают луженые концы секций обмотки якоря из крутых проводов и соединяют эти концы с коллекторными пластинами пайкой. Пайка производится мягким (при классе нагревостойкости изоляции В) или твердым (при классах F и H) припоем. Коллекторы с креплением пластины пластмассой имеют меньшую трудоемкость и стоимость, так как при их изготовлении исключается механическая обработка крепежных деталей. Недостатком таких коллекторов является то, что условия охлаждения пластмассового корпуса затруднены (низкая теплопроводность пластмассы, большая ее толщина, отсутствие аксиальных вентиляционных каналов).

У машин с $h > 200 \dots 280$ мм (см. рис. 6.8.) коллекторные пластины крепят с помощью чугунной или стальной втулки, стальных нажимных конусных фланцев и кольцевой гайки, заменяемой в длинных коллекторах шпильками. В коллекторах с металлическим креплением для улучшения охлаждения предусмотрены аксиальные вентиляционные каналы. Коллекторные пластины изолируют от корпуса втулкой, а от нажимных фланцев — конусными манжетами, изготовленными из миканита или слюдинита. В пластинах коллектора фрезеруют канавки, в которых размещают и припаивают медные «петушки» (флажки). Концы секций обмотки якоря соединяют с «петушками» также пайкой. Для пайки в зави-

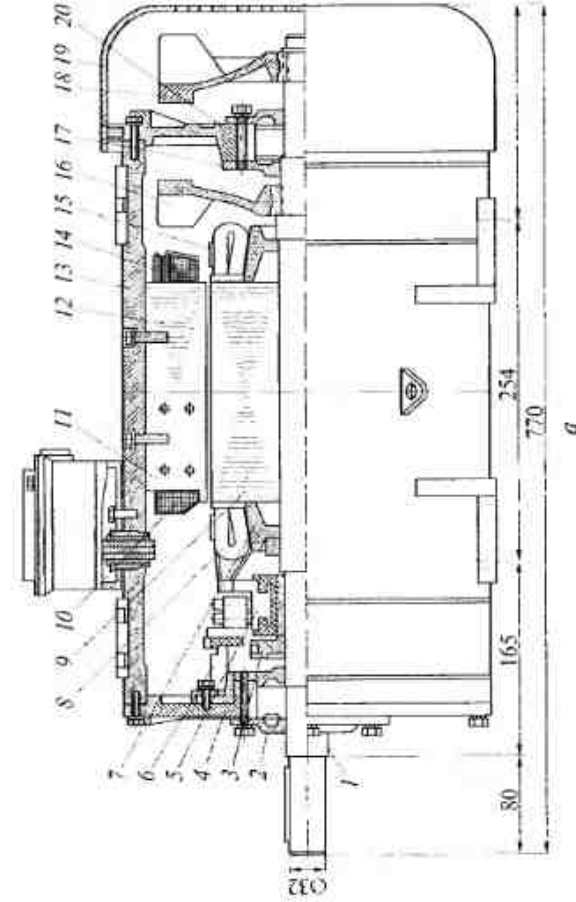
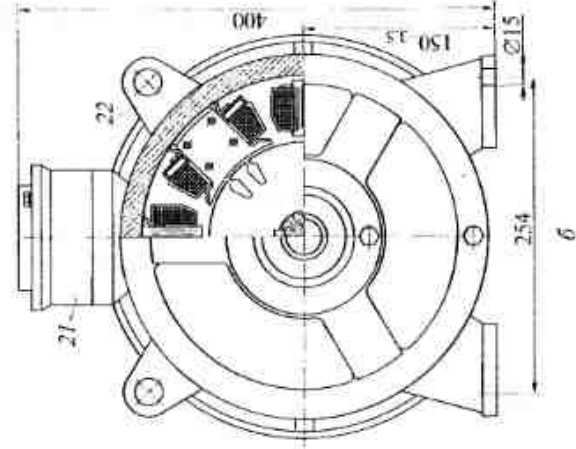


Рис. 6.10. Общий вид двигателя постоянного тока с высотой оси вращения $h = 160$ мм, степень защиты IP44, способ охлаждения ISO141, мощность 7,5 кВт, $U_1 = 220$ В, $n = 1500$ мин⁻¹:

1 — вал; 2 — крышка подшипникового наружного; 3 — кольцо для размещения балансировочных грузов; 4 — шит подшипниковый; 5 — коллектор; 6 — траверса; 7 — обмоткодержатель; 8 — обмотка якоря; 9 — сердечник якоря; 10 — обмотка лобовых полюсов; 11 — сердечник лобового полюса; 12 — сердечник главного полюса; 13 — станина; 14 — параллельная обмотка главных полюсов; 15 — бандаж лобовой части обмотки якоря; 16 — вентилятор внутренней; 17 — крышка подшипниковой внутренней; 18 — вентилятор наружный; 19 — кожух наружного вентилятора; 20 — шит подшипниковый; 21 — коробка выводов; 22 — ушко транспортное



б

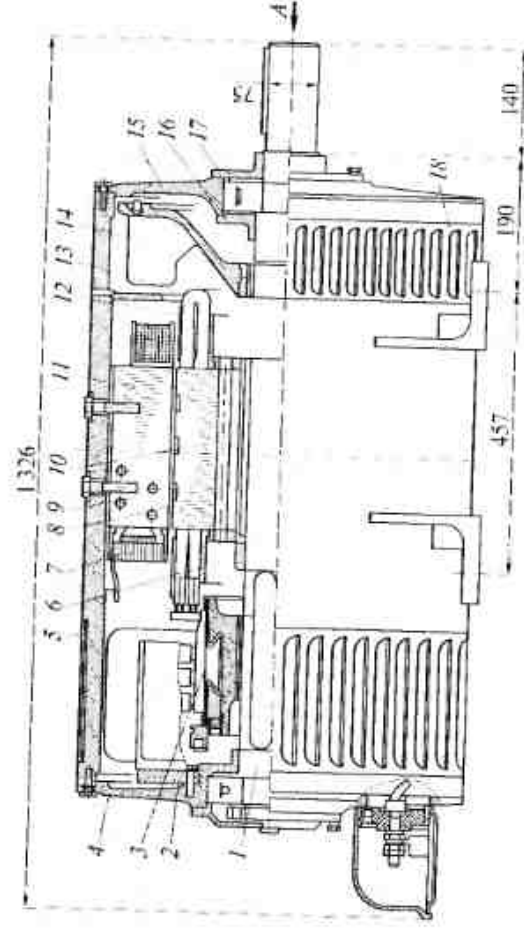


Рис. 6.11. Общий вид двигателя постоянного тока с высотой оси вращения $h = 280$ мм, степень защиты IP22, способ охлаждения IСO1, мощность 132 кВт, $U_1 = 220$ В, $n = 1500$ мин⁻¹;

1 — вал; 2 — граверка; 3 — коллектор; 4 — шит подшипниковый; 5 — станина; 6 — обмоткодержатель; 7 — обмотка добавочных полюсов; 8 — сердечник якоря; 9 — сердечник добавочного полюса; 10 — канал аксиальный вентиляторный; 11 — сердечник главного полюса; 12 — бандаж добавочной обмотки якоря; 13 — обмотка якоря; 14 — вентилятор; 15 — шит подшипниковый; 16 — крышка подшипниковая внутренняя; 17 — крышка подшипниковая наружная; 18 — жалюзий; 19 — ушко трансфертное; 20 — коробка выводов

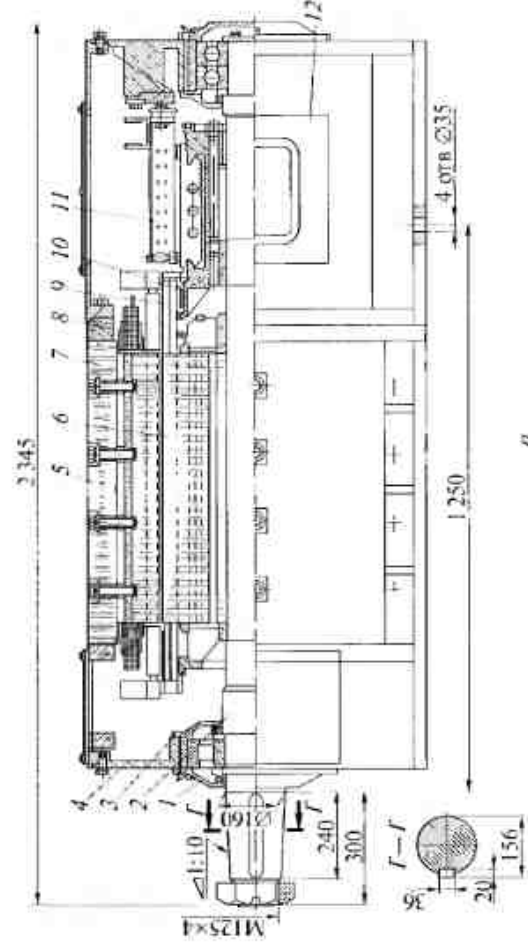


Рис. 6.12. Общий вид двигателя постоянного тока с высотой оси вращения $h = 450$ мм, степень защиты IP22, способ охлаждения IСO1, мощность 500 кВт, $U_1 = 440$ В, $n = 500$ мин⁻¹;

1 — крышка подшипниковая наружная; 2 — вал; 3 — крышка подшипниковая внутренняя; 4 — шит подшипниковый; 5 — сердечник станины; 6 — сердечник якоря; 7 — сердечник главного полюса; 8 — обмотка возбуждения главных полюсов; 9 — обмотка якоря; 10 — уравнительные соединения; 11 — бракет щеткодержателей; 12 — яма коллекторный; 13 — обмотка добавочных полюсов; 14 — сердечник добавочного полюса

симости от класса нагревостойкости изоляции используют мягкий или твердый припой. Конструкция переднего нажимного фланца предусматривает возможность размещения балансировочных грузов.

Чтобы соединить якорь машины с внешней цепью, на коллекторе устанавливаются щетки (рис. 6.9). В машинах с добавочными полюсами щетки устанавливаются на линии геометрической нейтрали. По окружности коллектора щетка обычно перекрывает две-три коллекторные пластины. Щеточное устройство имеет приспособление для регулирования силы нажатия щетки на коллектор (например, пружину) и обойму для закрепления щетки на пальце щеткодержателя. На каждом пальце размещается рядом несколько щеток, работающих параллельно. Число щеткодержателей обычно равно числу полюсов. Пальцы щеткодержателей закрепляют в траверзе и изолируют от последней изоляционными вулками. Траверза устанавливается на подшипнике (в машинах малой и средней мощности) или прикрепляется к станине (в машинах большой мощности). Все щеткодержатели одного знака соединяются сборными шинами, от которых идут отводы к зажимам машины.

Исполнение машины. По способу защиты различают: защищенные машины, имеющие приспособления, которые предохраняют машину от попадания внутрь посторонних тел и проникновения водяных капель и брызг; закрытые машины, защищенные, но не герметически, от проникновения наружного воздуха. Если машина имеет приспособления, не допускающие проникновения влаги внутрь машины при полном погружении ее в воду в течение 4 ч, то она называется герметически закрытой; взрывобезопасные машины должны противостоять взрывам газа внутри машины без передачи пламени изнутри машины наружу или в обратном направлении.

По способу охлаждения различают машины с естественной вентиляцией, с самовентилирующей, в том числе с наружной самовентилирующей, и машины с посторонним охлаждением.

На рис. 6.10 дан общий вид двигателя постоянного тока с высотой оси вращения $h = 160$ мм, на рис. 6.11 — общий вид двигателя постоянного тока с высотой оси вращения $h = 280$ мм, а на рис. 6.12 — общий вид двигателя постоянного тока с высотой оси вращения $h = 450$ мм. Как видно на приведенных рисунках, конструкция машин постоянного тока существенно зависит от мощности машины, степени ее защиты и способа охлаждения.

6.4. Обмотки якоря

В настоящее время применяют якоря барабанного типа, в которых проводники обмотки укладывают в два слоя в пазы, расположенные на наружной поверхности якоря (рис. 6.13, а). Для того

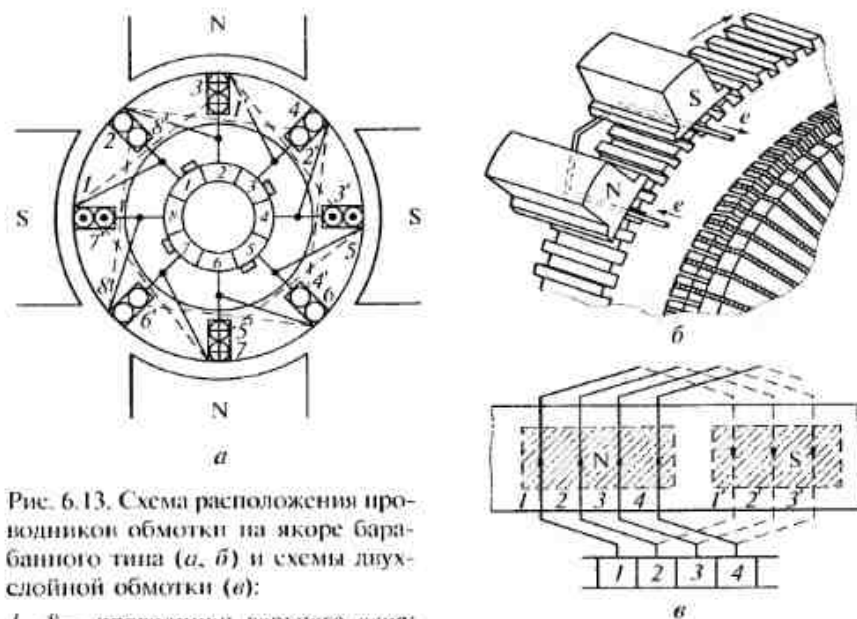


Рис. 6.13. Схема расположения проводников обмотки на якоре барабанного типа (а, б) и схемы двухслойной обмотки (в):

1...8 — проводники верхнего слоя;
1'...8' — проводники нижнего слоя

чтобы ЭДС, индуцированные в двух сторонах каждого витка, складывались, стороны его следует располагать под полюсами противоположной полярности (рис. 6.13, б). В этом случае в каждом витке индуцируется ЭДС в 2 раза большая, чем в одном проводнике.

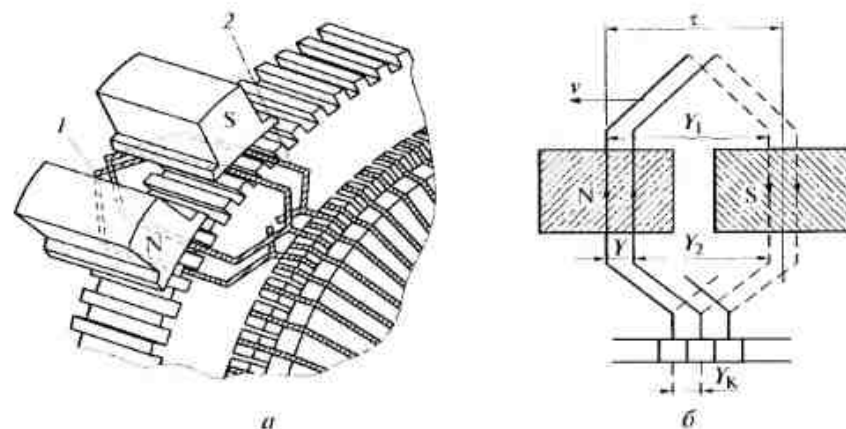


Рис. 6.14. Общий вид петлевой обмотки (а) и схема соединений ее секций (б):

1, 2 — секции

Следовательно, основной шаг обмотки должен быть примерно равен полюсному делению.

Обмотки барабанного якоря подразделяют на две основные группы: *петлевые* (параллельные) и *волновые* (последовательные). В машинах большой мощности применяют также «*лягушачью*» (параллельно-последовательную) обмотку, в которой сочетаются элементы петлевой и волновой обмоток. Основной частью каждой обмотки является секция, состоящая из одного или нескольких последовательно включенных витков; концы секции присоединяют к двум коллекторным пластинам. Все секции обмотки обычно имеют одинаковое число витков.

На схемах обмоток секции для простоты всегда изображают одновитковыми. При двухслойной обмотке стороны секции, расположенные в верхнем слое, изображают сплошными линиями, а в нижнем — штриховыми (рис. 6.13, в). Шаг секции y_1 (его называют также первым частичным шагом обмотки) должен быть приблизительно равен полюсному делению τ .

При простой петлевой обмотке секцию присоединяют к соседним коллекторным пластинам (рис. 6.14). Для выполнения обмотки необходимо знать ее результирующий шаг y (рис. 6.14, б), первый y_1 и второй y_2 частичные шаги, а также шаг по коллектору y_k . *Результирующим шагом* обмотки называют расстояние между начальными сторонами двух секций, следующих одна за другой по ходу обмотки; *первым частичным шагом (шагом секции)* называют расстояние между двумя сторонами каждой секции; *вторым частичным шагом* — расстояние между конечной стороной одной секции и начальной стороной следующей секции. Указанные расстояния обычно выражают в числе пройденных секций. *Шагом по коллектору* называют расстояние (в коллекторных делениях) между пластинами, к которым присоединены две стороны каждой секции.

Поскольку $K = S$ (K — число коллекторных пластин, S — количество секций), то результирующий шаг обмотки y и шаг по коллектору y_k равны. При петлевой обмотке $y = y_1 - y_2$ и $y_k = y$.

Обмотку называют *простой*, если $y = y_k = \pm 1$. В этой обмотке каждая последующая секция расположена рядом с предыдущей, а якорная катушка имеет форму петли (рис. 6.14, а), что обусловило название этой обмотки. Обычно при выполнении обмотки принимают $y_k = +1$ (неперекрещенная обмотка), так как в этом случае несколько снижается расход обмоточного провода. На рис. 6.15 приведены формы якорных катушек для петлевой и волновой обмоток.

В простой петлевой обмотке секции, расположенные под каждой парой полюсов, образуют две параллельные ветви. В каждую из параллельных ветвей входит $S_n = S/(2p)$ секций; поэтому число параллельных ветвей во всей обмотке равно

$$2a = S/S_n = 2p. \quad (6.3)$$

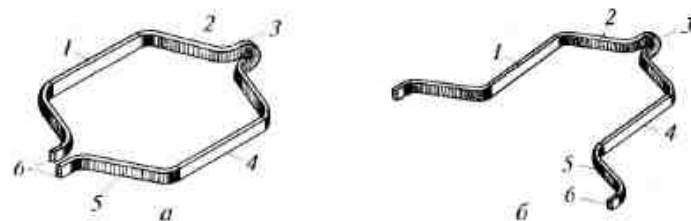


Рис. 6.15. Формы якорных катушек петлевой (а) и волновой (б) обмоток: 1, 4 — базовые части; 2, 5 — лобовые части; 3 — задняя головка; 6 — концы секций, присоединенные к коллектору

Равенство $2a = 2p$ выражает основное свойство простой петлевой обмотки: чем больше число полюсов, тем больше параллельных ветвей имеет обмотка. Следовательно, тем больше щеточных пальцев должно быть в машине. Поэтому простую петлевую обмотку часто называют *параллельной*.

На рис. 6.16, а показана схема расположения щеток в четырехполюсной машине и образующиеся параллельные ветви. В реальной машине коллекторные пластины 1, 2 смещены относительно соединенных с ними секций на половину полюсного деления, поэтому щетки расположены по осям главных полюсов, а соединенные с ними секции — на геометрической нейтральной (рис. 6.16, б).

На рис. 6.17, а для примера и изображена схема петлевой обмотки четырехполюсной машины, а на рис. 6.17, б — ее эквивалентная схема, показывающая последовательность соединения отдельных секций петлевой обмотки и образующиеся при этом параллельные ветви. Цифрами 1, 2, 3 и т.д. обозначены активные проводники, расположенные в верхнем слое, а цифрами 1', 2', 3' — лежащие в нижнем слое обмотки.

ЭДС E , индуцированные во всех параллельных ветвях петлевой обмотки, теоретически должны быть равны. Практически из-за технологических допусков в значениях воздушного зазора под разными полюсами, из-за дефектов литья в корпусе и других причин магнитные потоки отдельных полюсов несколько различаются между собой, а поэтому в параллельных ветвях индуцируются неодинаковые ЭДС. Разница между ними составляет 3...5%, однако вследствие небольшого сопротивления обмотки якоря этого оказывается достаточным для того, чтобы по параллельным ветвям даже при холостом ходе проходили значительные уравнительные токи, которые загружают щетки и способствуют возникновению искрения на коллекторе. Чтобы уравнительные токи замыкались помимо щеток, в петлевых обмотках предусматривают уравнительные соединения точек обмотки, имеющих теоретически равные потенциалы. Обычно между собой соединяют коллекторные пластины, к которым подключены равнопотенциальные точки обмот-

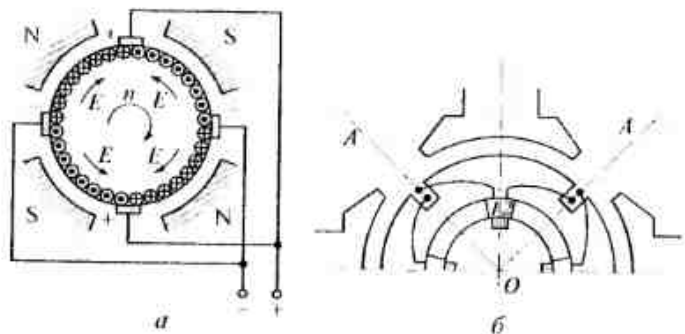


Рис. 6.16. Обмотки якоря четырехполюсной машины:
a — условная схема; *б* — реальное расположение частей обмотки и полюсов; 1, 2 — коллекторные пластины

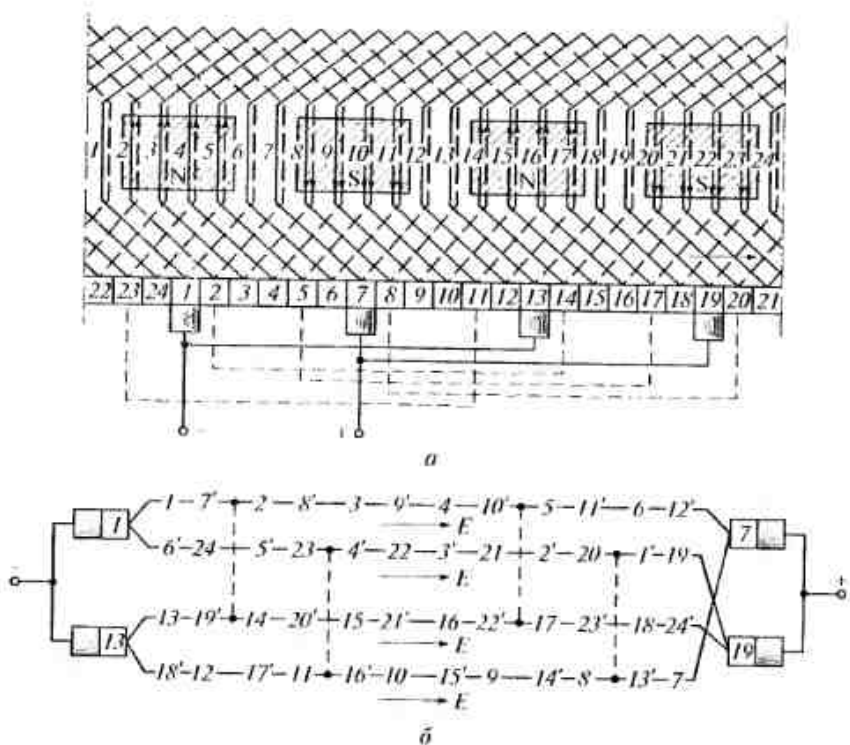


Рис. 6.17. Схема неглевой обмотки (*a*) и ее эквивалентная схема (*б*):
 $S = K = 24$; $y_1 = 6$; $y_2 = 5$; $y = y_A = 1$; 1...24 — активные проводники, расположенные в верхнем слое обмотки; 1'...24' — активные проводники, лежащие в нижнем слое обмотки

ки (штриховые линии на рис. 6.17). Достаточно иметь одно или два уравнительных соединения на каждую группу секций, лежащих в одном пазу якоря, т.е. снабжать уравнительными соединениями половину или одну треть коллекторных пластин. Уравнительные соединения располагают обычно под лобовыми частями обмотки рядом с коллектором. В этом случае они находятся вне магнитного поля главных полюсов и в них ЭДС не индуцируется. Токи, проходящие по уравнительным соединениям, параллельным ветвям обмотки якоря, создают МДС, которые уменьшают неравенство магнитных потоков отдельных полюсов.

При простой волновой обмотке секции, лежащие под разными полюсами, соединяют последовательно (рис. 6.18, *a*). При этом после одного обхода окружности якоря, т.е. последовательного соединения секций, приходят к коллекторной пластине расположенной рядом с исходной. Результирующий шаг обмотки (рис. 6.18, *б*) $y = y_1 + y_2$ и частичные шаги ($y_1 = y_2$) приблизительно равны полюсному делению τ , а шаг по коллектору y_k — двойному полюсному делению. Между шагом по коллектору y_k и количеством коллекторных пластин K существует следующая зависимость:

$$py_k \pm 1 = K,$$

откуда

$$y_k = (K \mp 1)/p. \quad (6.4)$$

Поскольку значение y_k должно быть целым числом, то число коллекторных пластин K не может быть произвольным. Предпочтительно брать $y_k = (K - 1)/p$ (неперекрещенная обмотка), так как при этом несколько уменьшается расход обмоточного провода. Якорная катушка в рассматриваемой обмотке имеет форму волны

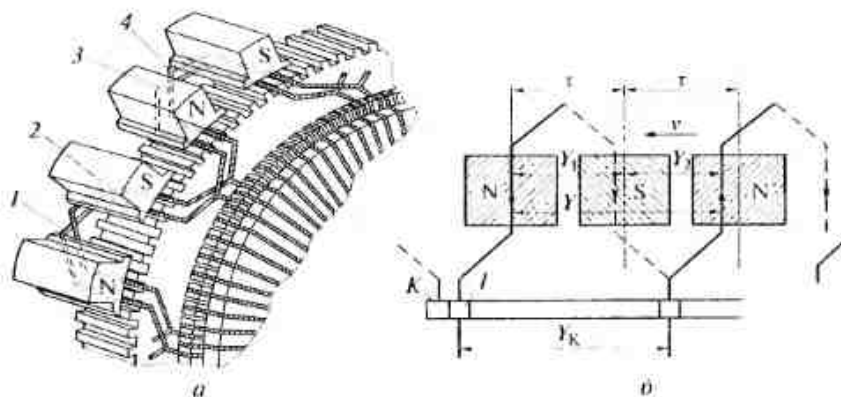


Рис. 6.18. Общий вид волновой обмотки (*a*) и схема соединения секций обмотки (*б*):

1...4 — секции

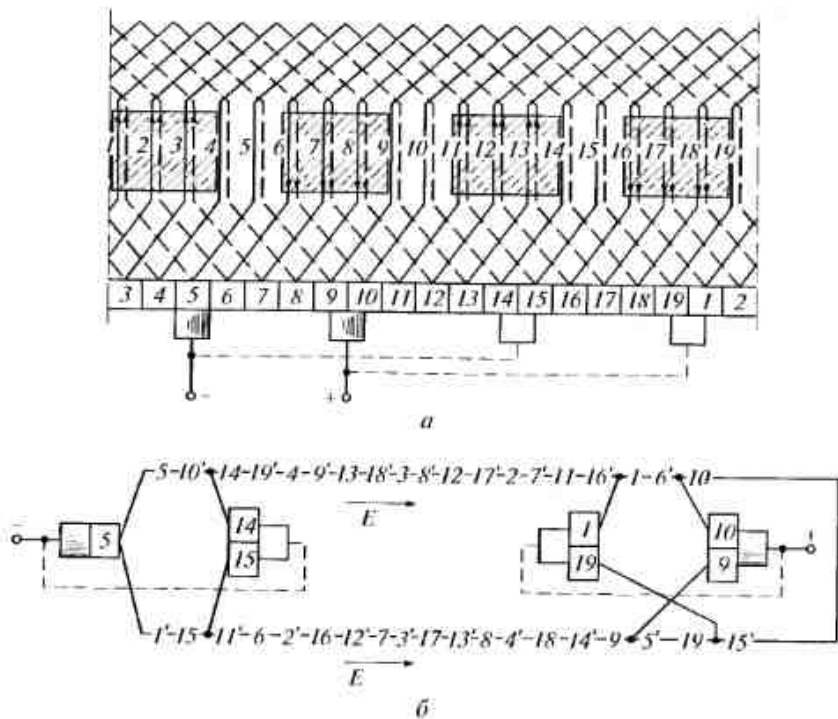


Рис. 6.19. Схема волновой обмотки (а) и ее эквивалентная схема (б); $S = K = 19$; $y_1 = 5$; $y_2 = 4$; $y - y_n = 9$; 1—19 — проводники верхнего слоя и коллекторные пластины; 1'—19' — проводники нижнего слоя

(см. рис. 6.15, б), поэтому обмотку называют *волновой*. В якоре барабанного типа направление ЭДС сохраняется неизменным во всех сторонах секций, расположенных в пределах одного полюсного деления, т.е. в $S/(2p)$ сторонах секций. В простой волновой обмотке при одном обходе окружности якоря соединяют последовательно $2p$ сторон секций, поэтому число секций в каждой параллельной ветви $S_n = pS/(2p) = S/2$, а число параллельных ветвей обмотки $2a = S/S_n = 2$.

Следовательно, число параллельных ветвей при простой волновой обмотке не зависит от числа полюсов и всегда равно 2. Поэтому такую обмотку часто называют *последовательной*. Уравнивательные соединения при простой волновой обмотке не требуются, так как в каждую параллельную ветвь входят секции, стороны которых расположены под всеми полюсами. В результате неравенство потоков отдельных полюсов не вызывает неравенства ЭДС в параллельных ветвях.

Последовательность соединения отдельных секций волновой обмотки и образующиеся при этом параллельные ветви показаны

на рис. 6.19 на примере волновой обмотки четырехполюсной машины, имеющей 19 секций. При волновой обмотке в машинах малой мощности устанавливают только два щеточных пальца; в более мощных машинах для уменьшения плотности тока под щетками и улучшения токосъема обычно ставят полный комплект ($2p$) щеточных пальцев.

Двухполюсные машины небольшой мощности выполняют с простой петлевой обмоткой, так как при двух полюсах волновая обмотка превращается в петлевую. По мере увеличения мощности переходят к более компактным четырехполюсным машинам, имеющим меньшую массу, чем двухполюсные. Четырехполюсные машины небольшой и средней мощности часто имеют волновую обмотку, не требующую применения уравнивательных соединений. При повышенном напряжении на щетках (до 1000 В и более) такую обмотку применяют в четырехполюсных машинах мощностью до 300 кВт.

Если напряжение на коллекторе невелико (110 или 220 В), то уже при мощности в десятки киловатт применяют четырехполюсные машины с петлевой обмоткой для уменьшения тока в параллельной ветви. Значение тока в параллельной ветви даже в очень мощных машинах не должно превышать 250...300 А, так как при выполнении обмотки из проводников большого сечения возникают значительные технологические трудности при изготовлении якорных катушек и их укладке. При простой петлевой обмотке ток $i_a = I_a/(2a) = I_a/(2p)$, поэтому с увеличением мощности и тока машины для сохранения тока i_a в допустимых пределах увеличивают число полюсов.

При мощности более 1000 кВт необходимо применять сложные многоходовые обмотки якоря. В простейшем случае многоходовые обмотки представляют собой m простых петлевых или волновых обмоток, наложенных на общий якорь и смещенных относительно друг друга. В сложной петлевой обмотке число параллельных ветвей $2a = 2pm$, а в сложной волновой — $2a = 2m$, где

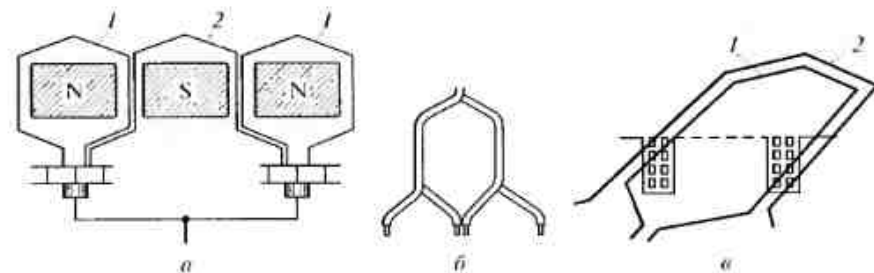


Рис. 6.20. Схема соединений секций «лягушечьей обмотки» (а), форма ее якорной катушки (б) и расположение проводников в пазах (в);

1 — петлевая часть обмотки, 2 — волновая часть обмотки

m — число ходов обмотки. Результирующий шаг обмотки и шаг по коллектору соответственно равны: $y = y_k = \pm m$; $y = y_k = (K \pm m)/p$. Применение многоходовых обмоток позволяет увеличивать число параллельных ветвей при неизменном числе полюсов, увеличение которых в ряде случаев невозможно. Однако эти обмотки требуют сложных уравнительных соединений.

В машинах большой мощности часто используют параллельно-последовательную «лягушачью обмотку», представляющую собой комбинацию простой петлевой и многоходовой волновой обмоток (рис. 6.20). Обе обмотки уложены в одни и те же пазы и имеют общие коллекторные пластины. Чтобы уравнять ЭДС параллельных ветвей, образуемых петлевой и волновой обмотками, число параллельных ветвей $2a$ этих обмоток должно быть одинаковым; для этого число ходов m волновой обмотки должно быть равно p . Секции волновой и петлевой обмоток являются друг для друга уравнителями, поэтому «лягушачью обмотку» выполняют без специальных уравнительных соединений.

6.5. Создание ЭДС в обмотке якоря и момента вращения

Рассмотрим процесс индуцирования ЭДС в обмотке якоря, проводники которой для простоты будем считать равномерно распределенными вдоль окружности якоря (рис. 6.21, а). При вращении якоря в проводниках, находящихся под полюсами N и S, индуцируются ЭДС противоположного направления, а сами проводники расположены по обе стороны от геометрической нейтральной $O-O$ — оси симметрии, разделяющей полюсы.

Обмотка якоря выполнена в виде многофазной обмотки (рис. 6.21, б), состоящей из большого числа витков, подключенных к пластинам коллектора так, чтобы между каждой парой смежных коллекторных пластин были включены один или несколько витков. На коллектор накладывают щетки A и B, посредством которых вращающаяся обмотка якоря соединяется с внешней цепью. При вращении якоря между щетками A и B действует постоянная ЭДС E , равная сумме ЭДС, индуцированных во всех последовательно соединенных витках обмотки якоря, которые включены между щетками.

Чтобы подать от обмотки якоря во внешнюю цепь максимальное напряжение, эту цепь нужно присоединить к двум точкам обмотки якоря, между которыми существует наибольшая разность потенциалов. Такими точками при холостом ходе машины являются точки a и b (см. рис. 6.21, б), расположенные на геометрической нейтральной, где и следует устанавливать щетки A и B. При вращении якоря точки a и b смещаются с геометрической нейтральной, но

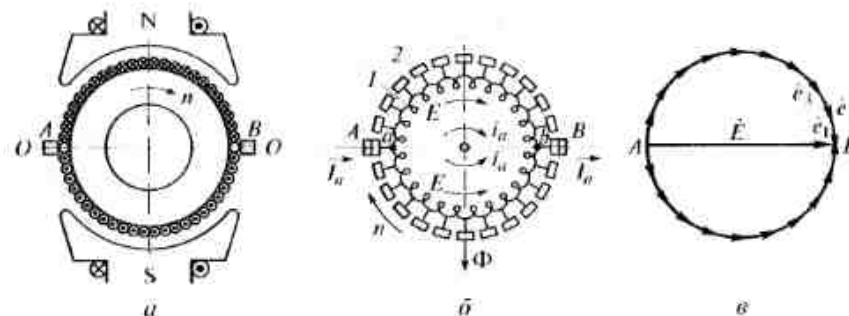


Рис. 6.21. Схема машины постоянного тока (а), упрощенная схема обмотки якоря (б) и векторная диаграмма индуцируемых в обмотке ЭДС (в): 1 — обмотка якоря; 2 — коллектор

к щеткам подходят новые точки обмотки, между которыми будет действовать также ЭДС E , поэтому ЭДС во внешней цепи неизменна по величине и направлению. Уменьшения пульсаций ЭДС E при переходе щеток с одной коллекторной пластины на другую достигают путем установки большого числа коллекторных пластин.

Если заменить несинусоидальную ЭДС, индуцируемую в витках обмотки якоря, эквивалентной синусоидальной, то значение ЭДС E между щетками A и B можно найти по векторной диаграмме (рис. 6.21, в). При достаточно большом числе секций обмотки якоря эта ЭДС практически неизменна во времени и равна диаметру окружности, описанной вокруг многоугольника ЭДС e_1, e_2, e_3 и т.д., индуцированных в отдельных витках этой обмотки.

Щетки A и B разделяют рассматриваемую обмотку на две параллельные ветви, в каждой из которых индуцируются ЭДС E и проходят токи i_a . При разомкнутой внешней цепи ток по обмотке не проходит, так как ЭДС, индуцированные в двух ее ветвях, направлены встречно и взаимно компенсируются. Полная компенсация, очевидно, происходит при строго симметричном выполнении обмотки и равенстве магнитных потоков полюсов; условие симметрии в случае двухполюсной обмотки сводится к равномерному распределению проводников на внешней поверхности якоря.

Мгновенное значение ЭДС (рис. 6.21, а), индуцируемой в каждом активном проводнике, определяют по формуле

$$e_x = B_x V_a l_a \quad (6.5)$$

где B_x — индукция в рассматриваемой точке x воздушного зазора; V_a — окружная скорость якоря; l_a — длина проводника в магнитном поле; i — число проводников одной ветви.

Следовательно,

$$E = \sum_{i=1}^{N/(2a)} e_i = V_a I_a \sum_{i=1}^{N/(2a)} B_{\gamma_i} \quad (6.6)$$

где N — общее число активных проводников обмотки якоря; $N/(2a)$ — число активных проводников, входящих в одну параллельную ветвь.

При достаточно большом числе коллекторных пластин можно пренебречь пульсацией ЭДС и считать, что

$$\sum_{i=1}^{N/(2a)} B_{\gamma_i} = \frac{N}{2a} B_{cp}, \quad (6.7)$$

где B_{cp} — среднее значение индукции в пределах полюсного деления $\tau = \pi D_a / (2p)$.

Учитывая, что $B_{cp} I_a \tau = \Phi$ и $V_a = \pi D_a n / 60 = 2\pi r n / 60$, получаем

$$E = \frac{pN}{60a} n \Phi = C_e n \Phi, \quad (6.8)$$

где $C_e = pN / (60a)$ — коэффициент, определяемый конструктивными параметрами машины и не зависящий от режима ее работы.

По формуле (6.8) определяют среднее значение ЭДС E . Мгновенное ее значение находится между величинами e_{max} и e_{min} . При вращении якоря часть витков замыкается накоротко щетками, выключается из параллельных ветвей, и за время поворота якоря на угол, соответствующий одной коллекторной пластине, сумма мгновенных значений ЭДС успевает несколько измениться. Максимальное значение возникающих при этом пульсаций $\Delta E = 0,5(e_{max} - e_{min})$ зависит от числа коллекторных пластин K :

K	2	4	8	10	20	40
$\Delta E, \%$	100	17,2	4	2,5	0,62	0,16

Значения ΔE приведены в процентах среднего значения ЭДС E . Период пульсации равен времени поворота якоря на одну коллекторную пластину, вследствие чего их частота в K/p раз больше частоты f_a , с которой изменяется ЭДС, индуцированная в проводниках обмотки якоря.

Если пренебречь падением напряжения в витках, то напряжение U_k между соседними коллекторными пластинами будет равно сумме ЭДС, индуцируемых во включенных между ними витках обмотки якоря. Например, для обмотки, состоящей из одновитковых секций (рис. 6.22, а), напряжение $U_k = 2e$. Из формулы (6.6) следует, что ЭДС пропорциональна индукции B_{γ} в соответствующей точке воздушного зазора, поэтому кривая распределения по окружности коллектора напряжений U_k между соседними пласти-

нами подобна кривой распределения индукции $B_{\gamma} = f(x)$ в воздушном зазоре (рис. 6.22, б).

Важной характеристикой надежности работы машины постоянного тока является так называемая потенциальная кривая, представляющая собой зависимость изменения напряжения U_k вдоль окружности коллектора. При переходе от одной коллекторной пластины к другой напряжение U_k изменяется ступенчато, но при достаточно большом числе коллекторных пластин эту зависимость можно заменить плавной кривой. Потенциальная кривая является интегральной относительно кривой магнитного поля $B_{\gamma} = f(x)$, так как площадь кривой магнитного поля пропорциональна сумме ЭДС, индуцируемых во всех витках, которые включены между щетками. Наибольшее напряжение между соседними коллекторными пластинами $U_{k,max}$ возникает там, где потенциальная кривая имеет наибольшую крутизну.

При холостом ходе машины ЭДС достигает максимального значения при установке щеток A и B на геометрической нейтральной. Если сместить щетки с геометрической нейтральной на некоторый угол α

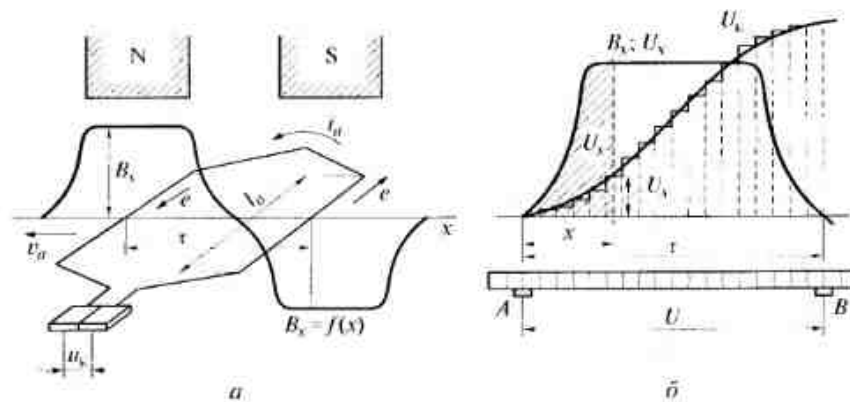


Рис. 6.22. Распределение магнитной индукции вдоль окружности якоря (а) и напряжения U_k по коллектору (б)

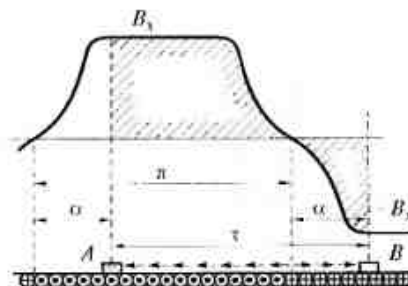


Рис. 6.23. Распределение магнитной индукции при сдвиге щеток с геометрической нейтральной

(рис. 6.23), то часть окружности якоря, соответствующая углу α , находится в зоне с индукцией $-B_a$, созданной полюсом противоположной полярности. При этом уменьшается результирующая ЭДС и напряжение U между щетками A и B , так как в проводниках якоря, расположенных в указанной зоне, индуцируются ЭДС, противоположные по направлению ЭДС, индуцируемым в остальных проводниках. Если принять распределение магнитной индукции в воздушном зазоре синусоидальным, то $E = C_e n \Phi \cos \alpha$.

На якорь, по обмотке которого проходит ток I_a , действует электромагнитный момент:

$$M = 0,5 F_{\text{рез}} D_a,$$

где $F_{\text{рез}}$ — результирующая электромагнитная сила, возникающая при взаимодействии тока с магнитным полем; D_a — диаметр якоря.

Сила $F_{\text{рез}}$ представляет собой сумму усилий F_i приложенных ко всем активным проводникам обмотки якоря. При достаточно большом числе коллекторных пластин силу $F_{\text{рез}}$ можно считать постоянной:

$$F_{\text{рез}} = \sum_{i=1}^N F_i = N F_{\text{сп}} = N B_{\text{сп}} I_a i_a = N B_{\text{сп}} I_a i_a / (2a), \quad (6.9)$$

где i_a — ток в одной параллельной ветви (см. рис. 6.22). С учетом значений $B_{\text{сп}}$ электромагнитный момент

$$M = p N i_a \Phi / (2\pi a) = C_m \Phi i_a, \quad (6.10)$$

где $C_m = p N / (2\pi a) = 60 C_e / (2\pi)$ — коэффициент, зависящий от конструктивных параметров машины. При работе машины в двигательном режиме электромагнитный момент является вращающим, а в генераторном режиме — тормозным.

6.6. Магнитное поле машины постоянного тока

Когда машина работает на холостом ходу, в ней действует только МДС основных полюсов, создающая основной магнитный поток. При нагрузке, когда по обмотке якоря протекает ток, возникает МДС якоря, взаимодействующая с основной МДС. Поэтому магнитный поток Φ , который существует в машине при работе ее под нагрузкой, следует рассматривать как результирующий поток, созданный результирующей МДС.

Воздействие МДС якоря на основную МДС называется *реакцией якоря*. Для анализа этого явления воспользуемся методом наложения, который состоит в следующем: строят картину основного потока Φ_0 и картину потока якоря Φ_a , затем совмещают их в один результирующий поток Φ .

Распределение основного потока в двухполюсной машине показано на рис. 6.24. Оно имеет симметричный характер как относительно осевой линии $Y-Y$ основных полюсов, так и относительно геометрической нейтральной, занимающих в пространстве

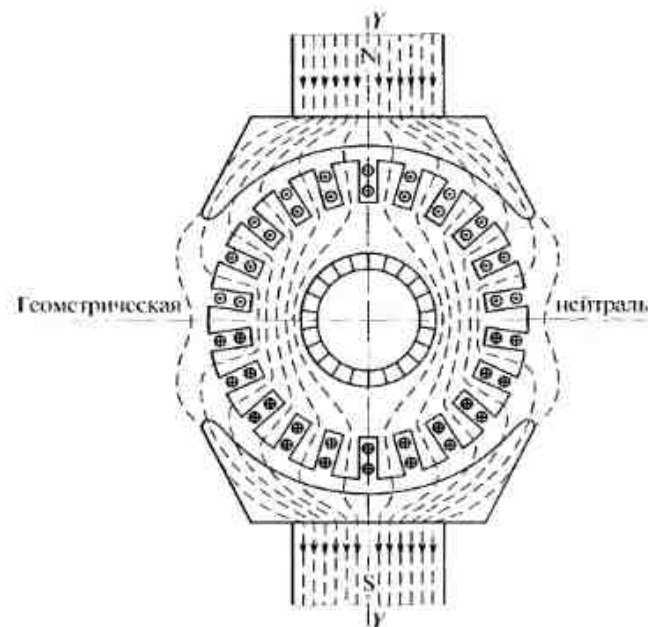


Рис. 6.24. Распределение основного магнитного потока в двухполюсной машине

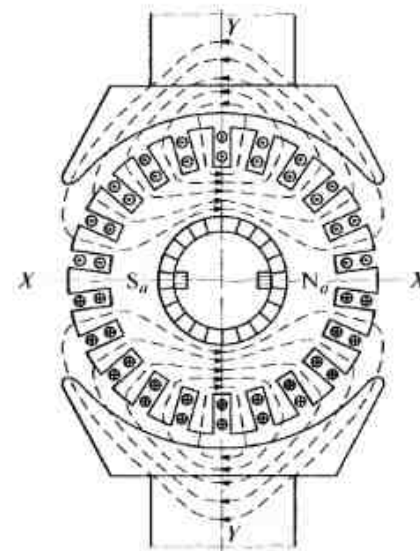


Рис. 6.25. Распределение магнитного потока якоря

неизменное положение. При вращении якоря против часовой стрелки в обмотке якоря индуцируются ЭДС в направлениях, показанных на рис. 6.24 точками и крестами.

Предположим, что машина не возбуждена и якорь неподвижен ($I_a = 0$ и $n = 0$). Щетки поставим по линии геометрической нейтрали и подведем к ним ток от постороннего источника постоянного тока. Получим две ветви обмотки якоря с противоположным направлением токов (рис. 6.25). Условимся, что направление токов в ветвях обмотки совпадает с направлением ЭДС, изображенной на рис. 6.2; для этого достаточно соответствующим образом подобрать направление подводимого к якорю тока. Чтобы построить создаваемый этими токами магнитный поток, нужно расположить его линии симметрично относительно средних точек обеих ветвей как относительно центров их МДС.

При положении щеток на нейтрали средние точки ветвей располагаются по линии, перпендикулярной нейтрали, и картина магнитного потока приобретает вид, показанный на рис. 6.25 прерывистыми линиями. Очевидно, что правая половина якоря приобретает северную полярность N_a , левая — южную S_a и, следовательно, осевая линия потока якоря совпадает с линией щеток.

При сдвиге щеток с нейтрали на какой-нибудь угол, на тот же угол и в этом же направлении поворачивается и ось потока якоря; другими словами, якорь представляет собой электромагнит, ось которого можно произвольно поворачивать, перемещая щетки по коллектору, при этом осевая линия потока якоря всегда совпадает с линией щеток.

Для определения МДС якоря приводим зубчатый якорь к гладкому, с равномерно распределенным по окружности якоря слоем проводников, но с тем же, как и в действительной машине, расчетным зазором δ' .

Если N — число всех проводников обмотки, а i_a — ток в одном проводнике (в ветви), то на единицу длины окружности якоря его линейная нагрузка определяется следующей формулой:

$$A = \frac{Ni_a}{\pi D_a} \quad (6.11)$$

Рассчитаем МДС якоря F_a на пару полюсов, полагая, что щетки находятся на геометрической нейтрали и шаг обмотки $y_1 = \tau$. Тогда якорь можно представить в виде, показанном на рис. 6.26. Средняя точка каждой ветви обмотки якоря находится на осевой линии соответствующего полюса. Линии поля якоря располагаются вокруг этой точки симметрично по обе ее стороны. Пусть одна из таких линий находится на расстоянии x от средней точки. Полный ток, охватываемый этим контуром, составляет $A \cdot 2x$ амперпроводников на полюс. Поскольку полный ток, охватываемый замк-

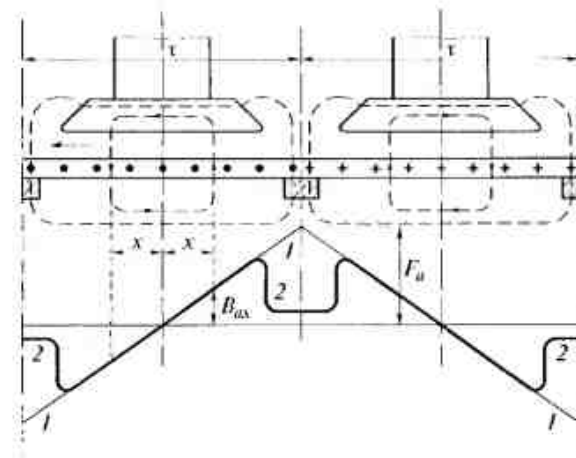


Рис. 6.26. МДС (1) и магнитная индукция (2) поля якоря

нутым контуром, равен МДС вдоль этого контура, то здесь и далее будем говорить только о МДС линий, составляющих магнитное поле, следовательно,

$$F_{ax} = A \cdot 2x \quad (6.12)$$

Условимся показывать магнитные индукции и МДС, направленные сверху вниз, отрицательными ординатами, а снизу вверх — положительными. Тогда кривая МДС якоря представит собой ломаную линию 1—1—1 (см. рис. 6.26), проходящую через ось абсцисс в средней точке между щетками и достигающую максимума F_a над каждой из щеток, т. е. при $x = \tau/2$. Подставив это значение x в формулу (6.12), получим

$$F_a = A \cdot 2(\tau/2) = A\tau \quad (6.13)$$

Чтобы определить индукцию B_{ax} , создаваемую МДС, необходимо знать магнитное сопротивление, встречаемое линией. Из анализа рис. 6.26 следует, что линия 2 раза проходит через зазор и замыкается по якорю и полюсному наконечнику. Сопротивление стали обычно весьма невелико по сравнению с сопротивлением зазора. Поэтому им можно пренебречь и считать, что сопротивление линии определяется только сопротивлением двойного зазора. Отсюда следует, что для всех линий, находящихся в пределах полюсной дуги, магнитное сопротивление одно и то же и начинает увеличиваться лишь после того, как выйдет в межполюсное пространство.

В пределах полюсной дуги

$$B_{ax} = \mu_0 H_{ax} = \mu_0 (F_{ax} / 2\delta') = \mu_0 (A/\delta')x.$$

При соответствующем выборе масштаба для кривой МДС на рис. 6.26 в пределах полюсной дуги кривая МДС совпадает с кривой индукции B_{ax} . В междуполюсном пространстве индукция быстро уменьшается вследствие значительного увеличения длины пути магнитной линии, а значит, и ее магнитного сопротивления; поэтому кривая 2 индукции имеет седлообразный характер.

Если привести якорь во вращение, то картина поля якоря, изображенная на рис. 6.25, не изменится, поскольку положение щеток, а стало быть, и ветвей обмотки якоря задано. В развернутом виде эта картина показана на рис. 6.27. Если якорь вращается в этом поле против часовой стрелки, то в пределах зоны aBb обмотки якоря индуцируются ЭДС (знак «+»), а в пределах зоны bAa — ЭДС (знак «-»). Если считать ветвью обмотки якоря ту часть ее, которая находится между щетками, то очевидно, что в одной половине секций каждой ветви индуцируются ЭДС одного знака, а в другой — иного. Следовательно, результирующая ЭДС в каждой ветви обмотки, а стало быть, и напряжение на щетках равны нулю.

При сдвиге щеток одновременно смещаются в том же направлении и на тот же угол линия, отделяющая одну ветвь обмотки якоря от другой, и ось поля якоря. Следовательно, напряжение на щетках, создаваемое полем якоря, равно нулю при любом положении щеток на коллекторе.

Условимся изображать поле якоря в виде вектора, занимающего то или иное положение в пространстве в зависимости от положения щеток.

На рис. 6.28, *a* изображена МДС поперечной реакции якоря. Поскольку щетки стоят по линии нейтрали $X-X$, то поле якоря направлено под углом 90° , т.е. поперек осевой линии основных полюсов $Y-Y$. Поэтому такое поле якоря называется поперечным и оно определяется поперечной МДС якоря

$$F_{aq} = F_a = At. \quad (6.14)$$

Положение щеток на линии геометрической нейтрали является их первым основным положением. При сдвиге щеток с нейтра-

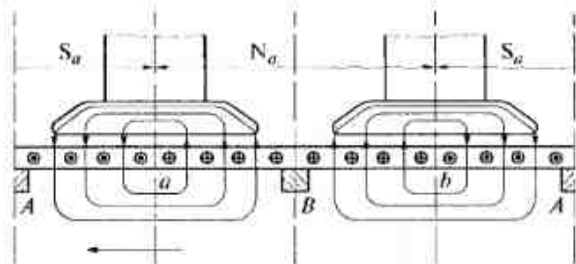


Рис. 6.27. ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря полем якоря

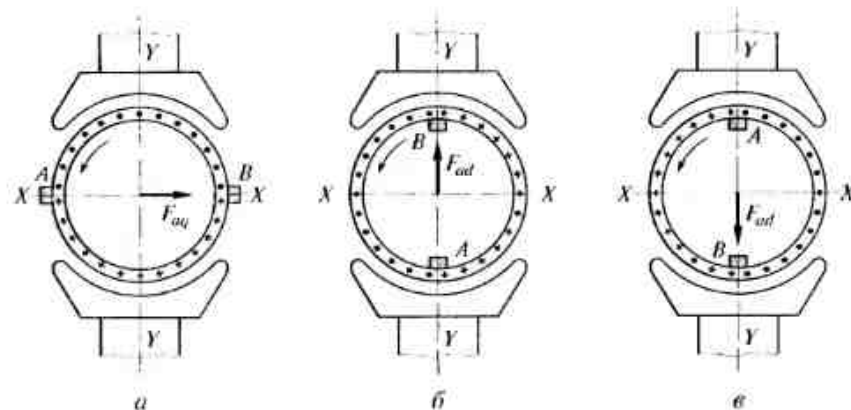


Рис. 6.28. МДС поперечной (*a*) и продольной (*b, в*) реакции якоря

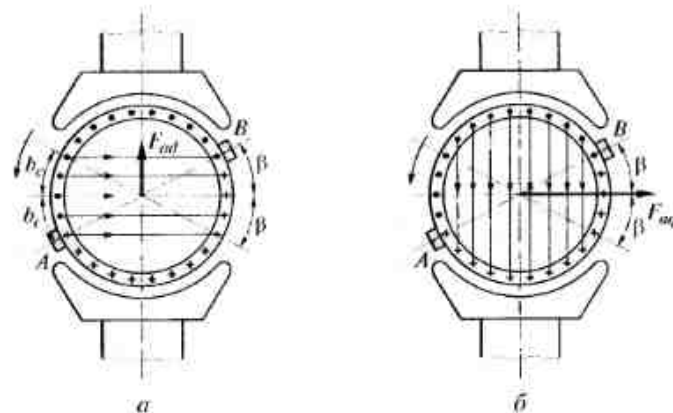


Рис. 6.29. Направление продольной (*a*) и поперечной (*b*) МДС якоря при сдвиге щеток с нейтрали

ли на угол $\pm 90^\circ$, т.е. на $\pm \tau/2$, ось поля якоря устанавливается по оси полюсов $Y-Y$ вверх или вниз от оси абсцисс (рис. 6.28, *b, в*). Такое поле якоря называется продольным и определяется продольной МДС якоря

$$F_{ad} = F_a = At. \quad (6.15)$$

Положение щеток по осевой линии полюсов является их вторым основным положением.

В общем случае щетки могут быть сдвинуты с нейтрали на угол β или соответственно по окружности якоря на дугу b_c (рис. 6.29). При этом якорь можно рассматривать как два совмещенных электромагнита, из которых один, образованный частью обмотки, за-

ключенной в двойном угле β , образует продольную МДС якоря $F_{ад}$, а другой, образованной остальной частью обмотки по дуге $\tau - 2(b_c)$, образует поперечную МДС якоря $F_{ар}$. Поскольку сдвигу щеток на единицу длины соответствует МДС $2A$, то при сдвиге щеток на дугу b_c на пару полюсов МДС имеем

$$F_{ад} = 2A(b_c) \quad (6.16)$$

и

$$F_{ар} = A[\tau - 2(b_c)]. \quad (6.17)$$

В машине, работающей под нагрузкой, МДС якоря взаимодействует с МДС основных полюсов, образуя результирующую МДС машины. Однако результирующий поток машины зависит не

только от взаимодействия этих МДС, но также и от возникающего при этом изменения магнитного сопротивления магнитной цепи.

Предположим, что машина работает в режиме генератора и вращается против часовой стрелки с некоторой постоянной частотой вращения. Рассмотрим несколько важных случаев реакции якоря, начав с простейшего.

Щетки стоят на нейтрали и сопротивление магнитной цепи

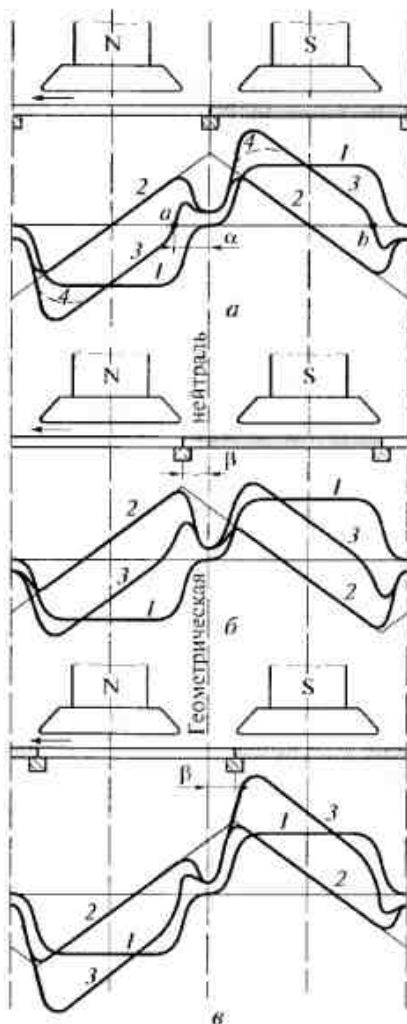


Рис. 6.30. Реакция якоря при различных положениях щеток:

a — щетки расположены на геометрической нейтрали; b — щетки сдвинуты влево на угол β от геометрической нейтрали; \bar{a} — щетки сдвинуты вправо на угол β от геометрической нейтрали; 1 — распределение основного поля; 2 — распределение поля якоря; 3 — результирующее поле генератора; 4 — то же, при насыщении полюсного наконечника и зубцовой зоны

не зависит от нагрузки ($\mu = \text{const}$). Если генератор возбужден так, как показано на рис. 6.30, a , то распределение основного поля под полюсом определяется кривой 1.

При вращении якоря в заданном направлении в левой ветви обмотки якоря индуцируется ЭДС, направленная к нам, а в правой — от нас. В том же направлении текут и токи. Очевидно, что картина распределения токов в обмотке якоря на рис. 6.30, a совпадает с распределением токов, показанном на рис. 6.25 и 6.26. Поэтому кривая 2 распределения поля якоря, изображенная на рис. 6.30, a , повторяет кривую 2, приведенную на рис. 6.26.

Наложив кривую 2 на кривую 1, т. е. сложив в каждой точке под полюсами ординаты обеих кривых, получим кривую 3 результирующего поля генератора (рис. 6.30). На рисунке видно, что на набегающих краях полюсов (справа от осевой линии полюсов) МДС якоря действует навстречу МДС полюсов, а на сбегающих (слева от осевой линии) — согласно с ней. Поэтому магнитная индукция под набегающим краем полюса уменьшается, т. е. этот край полюса размагничивается, а под сбегающим краем полюса она увеличивается, т. е. этот край полюса намагничивается. Однако в ненасыщенной машине действие поперечной МДС под набегающим и сбегающим краями полюса взаимно компенсируется, и результирующий поток Φ , определяемый площадью кривой 3, остается равным основному потоку Φ_0 , определяемому площадью кривой 1. Таким образом, поперечная МДС якоря искажает основной поток, не изменяя его по величине.

Точки a и b (см. рис. 6.30), в которых кривая результирующего поля машины проходит через нуль, определяют положение так называемой *физической нейтрали*. При холостом ходе физическая нейтраль совпадает с геометрической, а при нагрузке она смещается по направлению вращения якоря на некоторый угол α . Этот вывод не зависит от того, как возбужден генератор и в какую сторону он приводится во вращение.

Рассмотрим случай, когда щетки по-прежнему стоят на нейтрали, но сопротивление магнитной цепи зависит от нагрузки: $\mu \neq \text{const}$. Тогда существует только поперечная МДС якоря $F_{ар}$, характер действия которой показан на рис. 6.30, a . При перераспределении потока под полюсом сбегающий край последнего обычно довольно сильно насыщается и, следовательно, его магнитное сопротивление растет. Поэтому результирующий поток уменьшается по сравнению с основным потоком (кривая 4 на рис. 6.30, a), так как намагничивающее действие поперечной МДС якоря на сбегающем крае полюса слабее, чем размагничивающее действие ее на набегающем крае полюса. Чтобы учесть это ослабление магнитного потока машины, рассмотрим взаимодействие между основной МДС и поперечной МДС якоря.

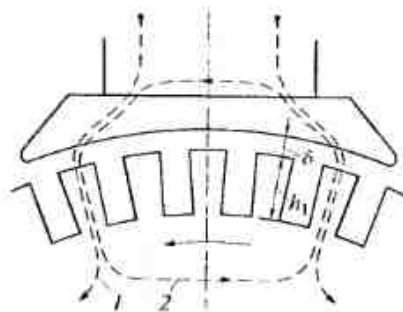


Рис. 6.31. Магнитные поля якоря:
1 — основное; 2 — поперечное

На рис. 6.31 показана линия основного магнитного потока (1) и линия поперечного потока якоря (2). Основными участками, где встречаются эти линии, являются воздушный зазор и зубцы. Незначительными участками в полюсном наконечнике и в сердечнике якоря, где эти линии существуют совместно, можно пренебречь, так как их магнитные сопротивления по сравнению с сопротивлениями первых двух участков невелики.

Таким образом, рассматривая взаимодействие основной и поперечной МДС, следует иметь в виду не всю основную МДС F_0 , а только ту ее часть $0,5(F_0 + F_1)$, которая тратится на проведение основного потока через зазор и по зубцам под одним полюсом. Соответственно этому следует пользоваться не полной кривой намагничивания $\Phi_0 = f(F_0)$, а так называемой переходной характеристикой, которая представляет собой зависимость $\Phi_0 = f(F_0 + F_1)/2$ (рис. 6.32, а). Эта же кривая в пересчитанном масштабе представляет собой зависимость

$$B_\delta = f(F_\delta + F_1)/2,$$

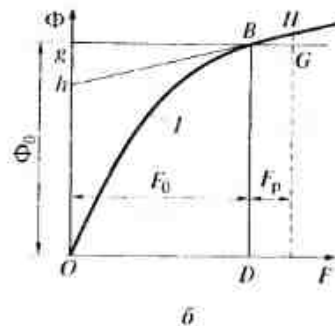
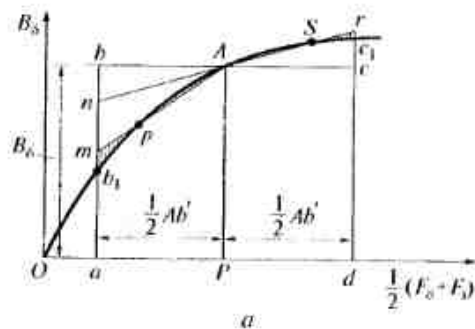


Рис. 6.32. Определение размагничивающей МДС поперечной реакции якоря:
а — переходная характеристика; б — графическое определение размагничивающей МДС; I — характеристика холостого хода

так как $B_\delta = \Phi_0$. С другой стороны, под полюсным наконечником действует не полная поперечная МДС $F_{aq} = At$, а только часть ее $a'F_{aq} = Ab'$, где b' — расчетная длина полюсной дуги. При этом половина этой МДС, т.е.

$$(a'F_{aq})/2 = (Ab')/2,$$

действует размагничивающе на набегающем крае полюса, а другая половина — намагничивающе на сбегающем крае полюса.

Предположим, что на рис. 6.32, а точка А переходной характеристики соответствует заданным условиям работы машины на холостом ходу, т.е. показывает индукцию $B_\delta = AP$ при МДС $(F_0 + F_1)/2 = OP$.

Отложим в обе стороны от точки P отрезки $Pa = Pd = (Ab')/2$. Тогда отрезки Oa и Od представляют собой результирующие МДС под набегающим и сбегающим краями полюса, а отрезки ab_1 и dc_1 — индукции под краями полюсного наконечника в точках, находящихся на расстоянии $b'/2$ по обе стороны от осевой линии основного полюса. Взяв промежуточные точки в пределах отрезка ad и рассуждая аналогично предыдущему, найдем, что участок b_1Ac_1 переходной характеристики дает распределение индукции в зазоре под полюсным наконечником при нагрузке.

Поскольку при заданном значении А прямоугольник $abcd$ на рис. 6.32, а имеет основание, пропорциональное дуге b' , а высоту, равную B_δ , то его площадь может служить мерой потока Φ_0 при холостом ходе машины. Соответственно площадь ab_1Ac_1d служит мерой потока при нагрузке. Так как площадь $Abb_1 > Acc_1$, то при заданном возбуждении нагрузка вызывает уменьшение потока в зазоре на величину $\Delta\Phi_0$, для определения которой воспользуемся следующим способом. Проведем прямые Am и Ar так, чтобы площади прямоугольных треугольников Abm и Acc_1 были соответственно равны по глазомерной оценке площадям криволинейных треугольников Abb_1 и Acc_1 . Продолжив прямую Ar до пересечения с отрезком ab в точке n , получим треугольник Abn , равный треугольнику Acr . Следовательно, площадь треугольника $S_{Ann} = S_{Abn} - S_{Abn}$ определяет собой искомое уменьшение потока $\Delta\Phi_0$. Если Φ_0 — поток при холостом ходе, то

$$\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0} = \frac{S_{Ann}}{S_{abcd}} = \frac{(1/2)(Ab \cdot mn)}{2Ab \cdot ab} = \frac{mn}{4ab}$$

МДС F_p , необходимая для компенсации размагничивающего действия реакции якоря, определяется отрезком BG , который по характеристике холостого хода соответствует потоку $\Delta\Phi_0 = GH$ (рис. 6.32, б). Если $\Delta\Phi_0$ невелико ($\Delta\Phi_0/\Phi_0 \leq 0,1$), то можно считать, что участок характеристики холостого хода BH представляет собой прямую линию. Продолжив ее до пересечения с осью орди-

нат, получим треугольник Bgh , подобный треугольнику BHG ; следовательно, $BG/GH = Bg/gh$, откуда

$$BG = GH (Bg/gh) = GH (Bg/Og)(Og/gh) = Bg(GH/Og)(Og/gh)$$

или

$$F_p = F_0(\Delta\Phi_0/\Phi_0)(Og/gh). \quad (6.18)$$

Рассмотрим случай, когда щетки сдвинуты с нейтрали по направлению вращения якоря. Соответствующие кривые показаны на рис. 6.30, б.

Кривая 1 основного поля осталась без изменения; кривая 2 поля якоря переместилась на угол β соответственно перемещению щеток. В этом случае имеем поперечную и продольную МДС якоря. Поперечная МДС F_{ap} , определяемая по формуле (6.17), искажает основное поле так же, как и в рассмотренных двух первых случаях. Продольная МДС F_{ad} определяется по формуле (6.16) и, как это видно на рис. 6.30, б, действует размагничивающе. Этот вывод имеет общий характер, т.е. в генераторе при сдвиге щеток по направлению вращения якоря возникает продольно-размагничивающая МДС якоря.

Рассмотрим случай, когда щетки сдвинуты с нейтрали против направления вращения якоря. Соответствующие кривые показаны на рис. 6.30, в. Обобщая, можно констатировать, что в генераторе при сдвиге щеток против направления вращения якоря возникает продольно-намагничивающая МДС якоря.

Рассмотрим реакцию якоря в двигателе. Если считать, что заданы полярность основных полюсов и направление вращения якоря, то разница между генератором и двигателем состоит в том, что в генераторе ток якоря течет по направлению индуцируемой в якоре ЭДС, а в двигателе — против нее. Поэтому МДС якоря двигателя действует в обратном направлении по сравнению с МДС якоря генератора.

В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- при положении щеток на геометрической нейтрали поперечная МДС якоря двигателя искажает основное поле, ослабляя его на сбегающем конце полюса и усиливая на набегающем;

- при сдвиге щеток с нейтрали по направлению вращения якоря в двигателе, наряду с поперечной МДС якоря, возникает еще продольная намагничивающая МДС якоря.

Определим МДС основных полюсов при нагрузке. Если машина работает генератором, то индуцируемая в ней ЭДС E_a состоит из напряжения U на зажимах генератора и падения напряжения в цепи якоря $I_a R_a$, т.е.

$$E_a = U + I_a R_a \quad (6.19)$$

При номинальных условиях работы падение напряжения $I_a R_a$ составляет обычно 3...10% U_n , т.е. $E_a = (1,03...1,1) U_n$. При постоянной частоте вращения якоря следует в таком же отношении увеличить полезный поток при нагрузке по сравнению с полезным потоком при холостом ходе. Кроме того, нужно преодолеть размагничивающую МДС якоря $F_p + F_{ad}$.

Следовательно, МДС на пару полюсов при нагрузке будет равна

$$F_m = F_\delta + F_i + F_{av} + F_p + F_{ad} + F_n + F_w, \quad (6.20)$$

т.е. сумме ЭДС отдельных участков магнитной цепи: воздушного зазора (F_δ), зубцов (F_i), якоря (с учетом продольной и поперечной реакции — F_{av} , F_{ad} , F_p), полюсов (F_n), ярма (F_w). Для всей машины значение МДС будет больше в p раз.

6.7. Коммутация

Коммутацией называется процесс изменения тока в секции, замкнутой накоротко щеткой при переходе секции из одной ветви обмотки в другую. Визуально плохая коммутация выражается в том, что машина искрит. Если искрение превышает некоторые пределы, то это приводит к порче коллектора и щеток, а также и к отказу машины. Поэтому безыскровая коммутация является необходимым условием длительной и надежной работы машины.

Для выяснения физической сущности коммутации рассмотрим якорь с простой волновой обмоткой, когда коммутирует только

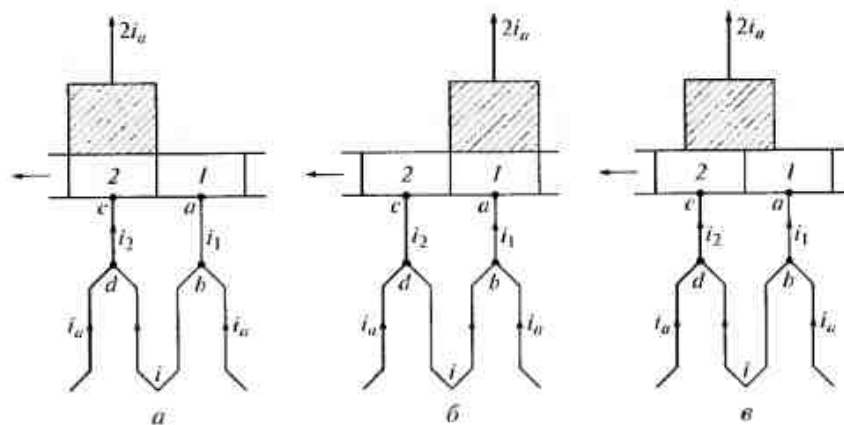


Рис. 6.33. Коммутация тока при $b_m = b_k$:

a — щетка расположена на пластине 2; b — щетка расположена на пластине 1; a — промежуточное положение щетки; 1, 2 — коллекторные пластины

одна секция (рис. 6.33, а). Предположим, что ширина щетки b_m равна коллекторному делению $t_k: t_k = b_k + b_m$, где b_k — ширина пластины; b_m — толщина изоляции между пластинами. В дальнейшем толщиной изоляции будем пренебрегать, т.е. будем считать, что $b_m = t_k = b_k$. Примем, что условия контакта одинаковы по всей поверхности прилегания щетки к коллектору. Пусть ток в каждой ветви равен i_a .

В тот момент, когда щетка находится над пластиной 2 (рис. 6.33, а), токи распределяются следующим образом: в проводнике cd ток $i_2 = 2i_a$, в проводнике ab ток $i_1 = 0$, а в секции между пластинами 1 и 2 течет ток i от узла b к узлу d ; это направление тока примем за положительное. Таким образом, $i = +i_a$. Спустя некоторое время T щетка «сбежит» с пластины 2 и расположится над пластиной 1 (рис. 6.33, б). В этот момент $i_1 = 2i_a$, $i_2 = 0$ и $i = -i_a$.

За время T ток в рассматриваемой секции изменяется от $+i_a$ до $-i_a$, т.е. на $2i_a$. Этот процесс называется *коммутацией тока* и составляет сущность явления, которые образуют коммутационный процесс. Время T , за которое происходит коммутация тока, называется *периодом коммутации*.

Положение щетки над пластиной 2 соответствует начальному моменту коммутации тока $t = 0$, а положение щетки над пластиной 1 — конечному моменту коммутации $t = T$. В промежуточные моменты щетка будет находиться частично над пластиной 1, а частично над пластиной 2 (рис. 6.33, в). В этом случае имеем замкнутую цепь, образованную щеткой, пластинами 1 и 2 и присоединенной к ним секцией.

Для определения зависимости $i = f(t)$ рассмотрим ряд случаев.

Коммутация при бесконечно малой скорости на окружности коллектора ($v_k \approx 0$). Этот случай не имеет реального значения, но наглядно показывает процесс коммутации в простейших условиях. Действительно, при $v_k \approx 0$ в коммутирующей секции нет индуцированных ЭДС. Ток $2i_a$ встречает на своем пути только сопротивление коммутирующей секции R_c , соединительных проводников $R_{m1} = R_{m2} = R_m$ и сопротивление контакта между коллектором и щеткой. При этом сопротивлениями коллекторных пластин и щетки можно пренебречь.

Коммутацию, определяемую только активными сопротивлениями, называют *коммутацией сопротивлением*. Данный процесс можно упростить, если пренебречь сопротивлением секции и соединительных проводников, так как преобладающее значение имеет сопротивление контакта щетки. Случай, когда коммутация обусловлена только сопротивлением контакта щетки, является основным.

Коммутация сопротивлением при $v_k = 0$, $R_c = 0$ и $R_{m1} = R_{m2} = R_m = 0$ (прямолинейная коммутация). При $v_k = 0$ в коммутирующей секции нет индуцированных ЭДС. Для замкнутой цепи, об-

разованной коммутирующей секцией и щеткой (см. рис. 6.33, в), имеем

$$i_1 R_{m1} - i_2 R_{m2} = 0, \quad (6.21)$$

где R_{m1} и R_{m2} — сопротивления контакта тех частей щетки, которые в данный момент перекрывают пластины 1 и 2.

При прочих равных условиях сопротивления R_{m1} и R_{m2} обратно пропорциональны площадям S_{m1} и S_{m2} соответствующих частей щетки. Поскольку $S_{m1} = b_{m1} l_m = v_k t l_m$ (где b_{m1} — ширина части щетки, набегавшей на пластину 1; l_m — длина щетки по оси коллектора; v_k — скорость на окружности коллектора; t — время, истекшее с начала коммутационного процесса), а $S_{m2} = b_{m2} l_m = v_k (T - t) l_m$ (где b_{m2} — ширина сбегавшей части щетки), то

$$R_{m1}/R_{m2} = S_{m2}/S_{m1} = (T - t)/t.$$

Следовательно, с учетом формулы (6.21)

$$i_1/i_2 = R_{m2}/R_{m1} = t/(T - t). \quad (6.22)$$

Поскольку от якоря к щетке подводится ток $2i_a$, то независимо от момента времени

$$i_1 + i_2 = 2i_a. \quad (6.23)$$

Решая совместно уравнения (6.21), (6.22) и (6.23), получаем:

$$i_1 = 2i_a(t/T)$$

и

$$i_2 = 2i_a((T - t)/T).$$

Тогда

$$i = i_a - i_1 = i_a - 2i_a(t/T) = 2i_a(1/2 - t/T). \quad (6.24)$$

Таким образом, в рассматриваемых условиях имеем прямолинейную коммутацию, т.е. такую, когда коммутирующий ток изменяется линейно в зависимости от времени (рис. 6.34, а).

Прямолинейная коммутация характеризуется тем, что плотности тока j_{m1} и j_{m2} во всех точках контакта под набегавшим и сбегавшим краями щетки одинаковы. Площадь набегавшего края щетки $S_{m1} = b_{m1} = t$; соответственно $S_{m2} = b_{m2} = T - t$. Следовательно,

$$j_{m1} = i_1/S_{m1} = i_1/t = \operatorname{tg} \alpha_1$$

и

$$j_{m2} = i_2/S_{m2} = i_2/(T - t) = \operatorname{tg} \alpha_2,$$

где α_1 и α_2 — углы, образованные с осью абсцисс касательными к кривой $i = f(t)$ в начальной и конечной ее точках.

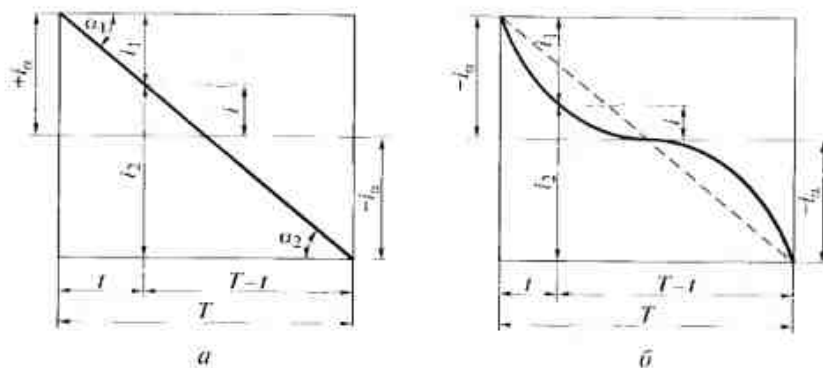


Рис. 6.34. Коммутация сопротивлением:
 а — прямолинейная коммутация; б — общий случай

При прямолинейной коммутации $\alpha_2 = \alpha_1 = \alpha$ на всем протяжении кривой $i = f(t)$; значит, независимо от момента времени

$$j_{m1} = j_{m2} = j_m = \text{const.}$$

Коммутация сопротивлением при $v_k \approx 0$, $R_c \neq 0$, $R_{m1} = R_{m2} = R_m \neq 0$. Для замкнутой цепи, образованной коммутирующей секцией и щеткой,

$$i_1 R_{m1} - i_2 R_{m2} - i_2 R_m - i R_c + i_1 R_m = 0. \quad (6.25)$$

Пусть R_m — сопротивление контакта всей щетки. Это сопротивление обратно пропорционально площади щетки $S_m = v_k T l_m$, следовательно,

$$R_{m1}/R_m = T/t \quad \text{и} \quad R_{m2}/R_m = T/(T-t),$$

отсюда

$$R_{m1} = R_m(T/t)$$

и

$$R_{m2} = R_m \frac{T}{T-t}.$$

Кроме того, в узлах *b* и *d* (см. рис. 6.33) $i_1 = i_a - i$ и $i_2 = i_a + i$. Тогда уравнение (6.23) можно переписать в следующем виде:

$$(i_a - i)R_m \frac{T}{t} - (i_a + i)R_m \frac{T}{T-t} - (i_a + i)R_m - iR_c + (i_a - i)R_m = 0,$$

или

$$i_a R_m T \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{T-t} \right) - i R_m T \left(\frac{1}{t} + \frac{1}{T-t} \right) - i(R_c + 2R_m) = 0.$$

Решая это уравнение относительно *i*, получим

$$i = 2i_a \frac{\frac{1}{2} - \frac{t}{T}}{1 + \frac{R_c + 2R_m}{R_m} \left[\frac{t}{T} \left(1 - \frac{t}{T} \right) \right]}. \quad (6.26)$$

Сопоставляя формулу (6.26) с формулой (6.22) видно, что она отличается от последней только вторым слагаемым в знаменателе, которое учитывает влияние сопротивления $R_c + 2R_m$.

Кривая $i = f(t)$, соответствующая изменению тока по формуле (6.26), показана на рис. 6.34, б; пунктиром изображен ток при прямолинейной коммутации.

Коммутация при скорости на окружности коллектора $v_k \neq 0$; $b_m = b_k$. При вращении якоря с определенной частотой вращения в коммутирующей секции возникают две ЭДС: самоиндукции e_L (вследствие изменения сцепленного с этой секцией магнитного потока от некоторого значения $+\Phi_k$, определяемого током $+i_a$ в начальный момент коммутации, до значения $-\Phi_k$, определяемого током $-i_a$ в конечный момент коммутации) и ЭДС внешнего поля e_k , индуцируемая в коммутирующей секции внешним полем, находящимся в зоне коммутации.

ЭДС самоиндукции создает в коммутирующей цепи добавочный ток коммутации i_k , который стремится скомпенсировать происходящие в этой цепи изменения тока. Поскольку по мере набегания щетки на пластину *1* (рис. 6.33, в) ток i_1 растет, а ток i_2 уменьшается, то ток i_k направлен навстречу току i_1 и согласно i_2 (рис. 6.35).

В противоположность e_L , e_k может иметь тот или иной знак в зависимости от направления внешнего поля, в котором находится коммутирующая секция. Таким образом, под суммой ЭДС e_L и e_k следует понимать их алгебраическую сумму.

Для коммутирующей цепи (см. рис. 6.35) уравнение ЭДС коммутации имеет следующий вид:

$$i_1 R_{m1} - i_2 R_{m2} - i_2 R_m - i R_c + i_1 R_m = e_L + e_k. \quad (6.27)$$

Пренебрегая сопротивлениями R_c и R_m , получаем уравнение ЭДС коммутации в упрощенном виде:

$$i_1 R_{m1} - i_2 R_{m2} = e_L + e_k. \quad (6.28)$$

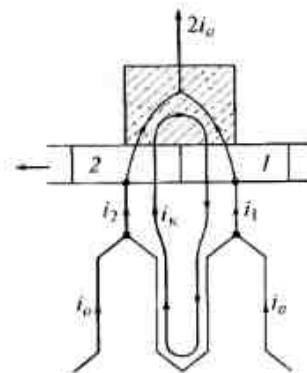


Рис. 6.35. Ток i_k , создаваемый ЭДС e_L :
 1, 2 — пластины

Подставив в это уравнение выражения для токов i_1 и i_2 и для сопротивлений R_{m1} и R_{m2} , получим:

$$i = 2i_a \left(\frac{1}{2} - \frac{t}{T} \right) + \frac{(e_l + e_k)}{R_m \frac{T}{t} - T} = i_a + i_s, \quad (6.29)$$

где

$$i_a = 2i_a \left(\frac{1}{2} - \frac{t}{T} \right) \quad \text{и} \quad i_s = \frac{e_l + e_k}{R_m \frac{T}{t} - T}. \quad (6.30)$$

Таким образом, коммутирующий ток i представляет собой сумму двух токов — тока прямолинейной коммутации i_a и налагающегося на него добавочного тока коммутации i_s , обусловленного суммой ЭДС $e_l + e_k$.

Замедленная коммутация при $b_m = b_k$. Предположим, что $e_k = 0$, следовательно,

$$i_s = \frac{e_l}{R_m \frac{T}{t} - T} = e_l / R_m.$$

Будем считать, что ЭДС $e_l = \text{const}$. Из приведенной формулы следует, что при $t = 0$ и $t = T$ сопротивление $R_m = \infty$ и при $t = T/2$ достигает минимума $R_m = 4r_m$.

Зависимость $R_m = f(t)$ имеет вид U-образной кривой (рис. 6.36, а).

Если наложить ток i_a (рис. 6.36, б) на ток i_a прямолинейной ком-

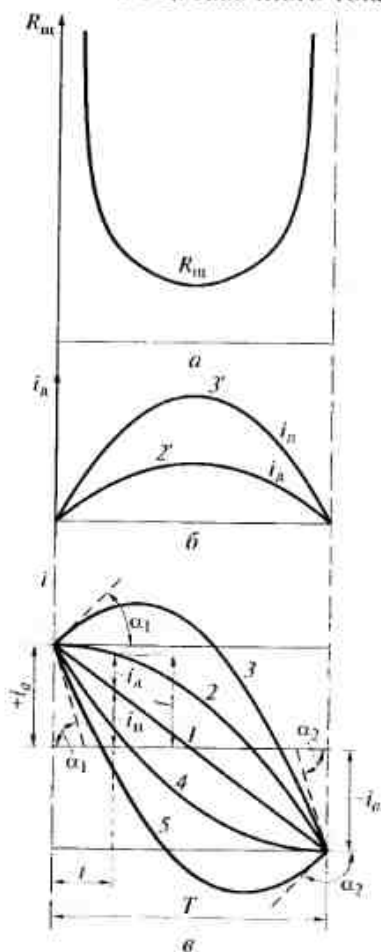


Рис. 6.36. Изменения в процессе коммутации:

а — сопротивление R_m ; б — тока i_a ; в — тока i ; Т — ток i_a при прямолинейной коммутации; 2, 3 — то же, при замедленной коммутации при наличии добавочного тока; 4, 5 — то же, при ускоренной коммутации

мутации (рис. 6.36, в), то получим кривую 2 коммутирующего тока i , проходящую выше прямой 1. Сопоставляя кривую 1 с 2, видно, что при действии ЭДС e_l ток i достигает определенного значения позже, чем при прямолинейной коммутации. Поэтому такая коммутация называется *замедленной*.

Ускоренная коммутация при $b_m = b_k$. Рассмотрим действие ЭДС внешнего поля e_k . Знак ЭДС e_k определяется направлением внешнего поля. Следовательно, в одном случае ЭДС e_k может быть направлена согласно с ЭДС e_l , а в другом случае — встречно с ней. В первом случае коммутация приобретает еще более замедленный характер и определяется кривой 3 на рис. 6.36, в. Во втором случае ток i_s меняет свой знак по сравнению с кривыми, приведенными на рис. 6.36, б, в соответствии с чем изменение тока i происходит по кривым 4 и 5, изображенным на рис. 6.36, в. Таким образом, если $e_k > e_l$ и действует навстречу e_l , то коммутация носит ускоренный характер, так как i достигает некоторого значения раньше, чем при прямолинейной коммутации.

При ускоренной коммутации плотность тока на сбегавшем крае щетки меньше, чем на набегающем, т. е. $j_{m2} = \text{tg } \alpha_2 < j_{m1} = \text{tg } \alpha_1$. При резко ускоренной коммутации (кривая 5 на рис. 6.36, в) угол $\alpha_1 = 90^\circ$, т. е. плотность тока j_{m1} стремится к бесконечности.

Работа машины постоянного тока часто сопровождается искрением щеток. В большинстве случаев оно наблюдается на сбегавшем крае, значительно реже на набегающем, но в общем случае может наблюдаться в любой точке под щеткой.

Искрение щеток — опасное явление, так как, выйдя за определенные границы, оно нарушает работу машины. Однако и требование абсолютно безыскровой или так называемой «темной коммутации» представляется чрезмерным, так как слабое точечное искрение под небольшой частью щеток неопасно для машины. В табл. 6.1 дана оценка состояния щеток в зависимости от степени искрения.

Степени искрения 1; 1,25 и 1,5 соответствуют таким условиям, когда при длительной работе коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей эксплуатации. При этих условиях коммутация считается практически без искрения и допускается для всех номинальных режимов работы.

Степень искрения 2 допускается при кратковременных перегрузках, толчках и реверсах (с реостатами или пусковыми ступенями).

Степень искрения 3 допускается только для моментов прямого включения или реверсирования машины, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы.

Причины искрения можно подразделить на две группы — механические и электромагнитные. К первой относятся: эксцентричное расположение коллектора на валу, плохая балансировка вра-

Таблица 6.1

Степень искрения	Характеристика степени искрения	Состояние коллектора и щеток
1	Отсутствие искрения («темная коммутация»)	Нормальное
1,25	Слабое точечное искрение под небольшой частью щетки	Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках
1,5	Слабое искрение под большей частью щетки	Появление следов почернения на коллекторе, легко устранимых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках
2	Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузках	Появление следов почернения на коллекторе, не устранимых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках
3	Значительное искрение под всем краем щетки с наличием крупных вылетающих искр. Допускается только для моментов прямого (без реостатных ступеней) включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы	Значительное почернение на коллекторе, не устранимое протиранием поверхности коллектора бензином, а также полгар и разрушение на щеток

шающихся частей, волнистая поверхность коллектора, выступающая слюда изоляционных прокладок, недостаточная формовка коллектора, следствием чего является (после непродолжительной работы) выступание отдельных пластин коллектора, плохое закрепление щеткодержателя, большое расстояние между щеткодержателем и коллектором, неравномерное расположение щеткодержателей по окружности коллектора, недостаточный (либо увеличенный) зазор между щеткой и щеткодержателем, неправильно выбранное давление на щетку и т. п.

Анализ причин электромагнитного характера привел к следующим выводам.

Если процесс коммутации определяется только активными сопротивлениями коммутирующей цепи, то такую цепь можно рассматривать, как безындукционную, замыкание которой в мо-

мент $t = 0$ и размыкание в момент $t = T_c$ происходит без искрения.

При преобладании в коммутирующей цепи ЭДС самоиндукции ($e_l - e_k = +\Delta e_l$) течение коммутационного процесса зависит от значения ЭДС Δe_l . Если оно ниже некоторого определенного критического значения $\Delta e_{l_{кр}}$, то сопротивление коммутирующей цепи изменяется по кривой, изображенной на рис. 6.36, а, т. е. в момент $t = T$ оно стремится к бесконечности, соответственно добавочный ток коммутации i_a стремится к нулю (рис. 6.36, б). В этом случае коммутация проходит без искрения. Но если $e_l \gg e_{l_{кр}}$, то начиная с момента $t = T/2$ сопротивление коммутирующей цепи почти не увеличивается и при $t = T$ ток $i_a \neq 0$. Следовательно, при сбегании щетки с коллекторной пластины коммутирующая секция имеет запас электромагнитной энергии $(L_c i_a^2)/2$, разряд которой при разрыве цепи тока и служит причиной искрения на сбегавшем крае щетки.

Искрение на набегавшем крае щетки возникает при резко ускоренной коммутации, обусловленной значительным преобладанием ЭДС внешнего поля e_k . При этом ток проходит лишь по небольшому числу первоначально возникающих точек контакта между щеткой и пластиной, что способствует значительному увеличению плотности тока и напряжению в этих точках, и если выделяющаяся при этом энергия достаточно велика, то набегавший край щетки начинает искрить. Будем считать, что обмотка имеет полный шаг, т. е. $y = \tau$, тогда при $b_m = b_k$ обе стороны коммутирующей секции находятся в одинаковых условиях по отношению к внешнему полю. Если B_k — среднее значение индукции этого поля и l_k — длина той части проводника, которая пересекает линии внешнего поля, то

$$e_k = 2w_c v_a l_k B_k. \quad (6.31)$$

Причиной искрения под всей щеткой является неровность поверхности контакта, приводящая к непрерывному и резкому изменению плотности тока в отдельных частях щетки.

Определим ЭДС самоиндукции e_l при $b_m = b_k$.

Поскольку коммутирующий ток изменяется от $+i_a$ до $-i_a$ за время T , то

$$e_l = \frac{1}{T} \int_{+i_a}^{-i_a} -L_c \frac{di}{dt} dt = 2L_c \frac{i_a}{T}, \quad (6.32)$$

где L_c — индуктивность коммутирующей секции, определяемая полным магнитным потоком секции, когда по ней протекает ток, равный 1 А.

В основу определения L_c положено понятие об удельной магнитной проводимости Λ , под которой понимают полный поток,

созданный единицей тока на единице длины секции, состоящей из одного витка.

Из анализа рис. 6.37, а, следует, что поток, сцепленный с секцией, можно разделить на три части: пазовую часть потока $\Phi_{\text{паз}}$, которая состоит из линий, идущих поперек паза от одной стенки к другой по длине $l + l = 2l$ активной части секции (рис. 6.37, б); зубцовую (дифференциальную) часть потока $\Phi_{\text{зуб}}$, которая состоит из линий, замыкающихся по воздуху от головки одного зуба к головке соседнего тоже по длине $2l$; лобовую часть потока $\Phi_{\text{л.об}}$, которая состоит из линий, замыкающихся вокруг лобовых частей секции по длине $2l_{\text{об}}$.

В соответствии с этим имеем три удельные магнитные проводимости: пазовую $\Lambda_{\text{п}}$, зубцовую $\Lambda_{\text{з}}$ и проводимость лобовых частей $\Lambda_{\text{л.об}}$.

Число потокоцеплений по всей длине секции составляет

$$2l\Lambda_{\text{п}} + 2l\Lambda_{\text{з}} + 2l_{\text{об}}\Lambda_{\text{л.об}} = 2l\left(\Lambda_{\text{п}} + \Lambda_{\text{з}} + \frac{l_{\text{об}}\Lambda_{\text{л.об}}}{l}\right) = 2l\Lambda'.$$

Величину Λ' будем называть удельной магнитной проводимостью секции.

Обычно секция состоит из w_c витков. В этом случае поток, сцепленный с секцией, увеличивается в w_c раз, а потокоцепление в w_c^2 раз. Следовательно, индуктивность такой секции равна

$$L_c = 2w_c^2 l \Lambda'. \quad (6.33)$$

Формула (6.33) справедлива, если в рассматриваемом пазу коммутирует только одна сторона секции. Однако обычно в том же пазу находится еще сторона другой коммутирующей секции, замкнутой накоротко щеткой другой полярности. В этом случае ЭДС самоиндукции e_l коммутирующей секции увеличивается велед-

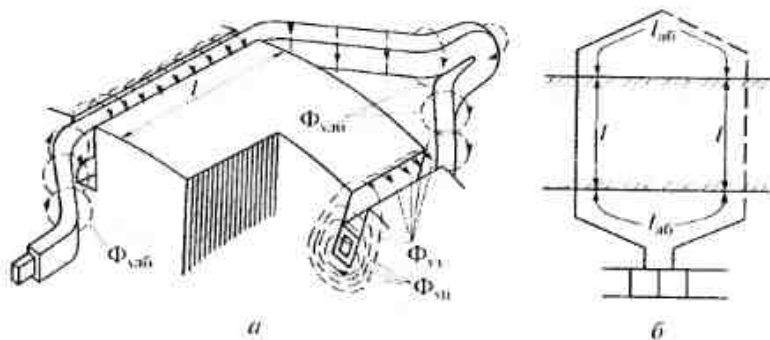


Рис. 6.37. Магнитный поток рассеяния секции: а — потоки рассеяния пазовой и лобовой частей; б — длины пазовой и лобовой частей

ствие индуктивного действия другой секции, т. е. все происходит так, как будто бы увеличилась проводимость Λ' . Поскольку коммутирующие активные стороны, находясь в одном пазу, тесно связаны индуктивно по длине l , то с достаточной точностью можно считать, что

$$\Lambda' = 2\left(\Lambda_{\text{п}} + \Lambda_{\text{з}} + \frac{l_{\text{об}}\Lambda_{\text{л.об}}}{l}\right). \quad (6.34)$$

Подставляя значение L_c в формулу (6.32), получаем

$$e_l = 2w_c^2 l \Lambda' \frac{2i_a}{T}.$$

Учтем, что

$$w_c = \frac{N}{2S} = \frac{N}{2K},$$

тогда

$$T = \frac{b_m}{v_k} = \frac{b_k}{v_k} = \frac{b_k \frac{D_a}{D_k}}{v_k \frac{D_a}{D_k}} = \frac{b_k \frac{D_a}{D_k}}{v_a},$$

где D_a и D_k — диаметры якоря и коллектора; v_a и v_k — линейные скорости на окружности якоря и коллектора.

Следовательно,

$$e_l = 2w_c l \Lambda' \frac{N}{2K} \frac{2i_a D_k}{b_k D_a} v_a$$

или, так как

$$Kb_k = \pi D_k,$$

то

$$e_l = 2w_c l \Lambda' \frac{Ni_a}{\pi D_a} v_a = 2w_c v_a l \Lambda' A. \quad (6.35)$$

Из формулы (6.35) следует, что машина тем труднее коммутирует, чем больше: число витков в секции w_c , окружная скорость v_a , линейная нагрузка машины A и длина якоря l . Поэтому обычно стремятся к тому, чтобы $w_c = 1$. Уменьшение v_a и в особенности A привело бы к увеличению массы машины. Поэтому в современных машинах постоянного тока для улучшения коммутации используют другие средства.

Коммутация при $b_m > b_k$. Обычно щетка перекрывает два-три коллекторных деления. При этом одновременно коммутирует не-

сколько секций, причем их стороны могут находиться в одном и том же пазу или в разных пазах. И в том и в другом случае каждая сторона действует индуктивно на остальные стороны. Следовательно, в коммутирующей катушке, кроме ЭДС самоиндукции e_L , возникает еще ЭДС взаимной индукции e_M , которая совместно с первой образует результирующую или реактивную ЭДС коммутации e_r .

Условия коммутации для различных секций, заложенных в один и тот же паз, различны. Время T между началом короткого замыкания первой секции в пазу и концом короткого замыкания последней секции в том же пазу называется периодом коммутации паза. При заданной частоте вращения якоря это время пропорционально ширине коммутационной зоны b_k , под которой понимаем часть окружности якоря, занятую коммутирующими секциями.

Для простой петлевой обмотки с полным шагом ширина b_k по окружности якоря определяется по следующей формуле:

$$b_k = b'_m + (n_a - 1) \frac{l_1}{n_a}, \quad (6.36)$$

где $b'_m = b_m \frac{D_a}{D_k}$ — ширина щетки, приведенная к окружности якоря и соответствующем периоду времени T ; n_a — число активных сторон в каждом слое паза (число секций в пазу); $\frac{l_1}{n_a}$ — часть окружности якоря, приходящаяся на одну секцию.

При $u_1 < \tau$ или в случае обмотки волнового типа зона коммутации несколько расширяется. Однако эти поправки не имеют существенного значения.

6.8. Способы улучшения и наладки коммутации

Основным способом улучшения коммутации является применение добавочных полюсов, с помощью которых в коммутационной зоне создается магнитное поле, индуцирующее коммутирующую ЭДС e_k требуемой величины. Только в машинах малой мощности (менее 300 Вт) удастся обойтись без добавочных полюсов.

Добавочные полюсы, устанавливаемые между главными полюсами (рис. 6.38, а), создают в зоне коммутации магнитное поле с такой индукцией B_k , чтобы при вращении якоря в коммутируемых секциях индуцировалась ЭДС $e_k = -e_r$. Обмотку добавочных полюсов включают последовательно в цепь якоря, а магнитную систему выполняют ненасыщенной. Поэтому коммутирующая ЭДС

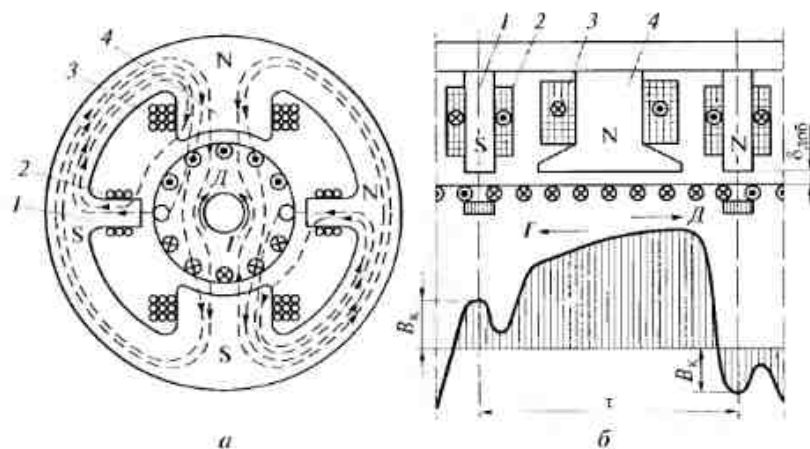


Рис. 6.38. Схема расположения главных и добавочных полюсов (а), магнитное поле в машине с добавочными полюсами (б):

1 — добавочный полюс; 2 — обмотки добавочного полюса; 3 — обмотки возбуждения; 4 — главный полюс

e_k пропорциональна току якоря и его линейной скорости v_a , которая, в свою очередь, пропорциональна частоте вращения:

$$e_k = 2B_k I_a v_a w_c = c_1 I_a v_a \quad (6.37)$$

Следовательно, ЭДС e_k изменяется по тому же закону, что и реактивная ЭДС:

$$e_r = (2I_a / T_a) L_{rc1} = c_2 I_a v_a \quad (6.38)$$

Таким образом, если осуществить взаимную компенсацию ЭДС $e_r + e_k = 0$ для какого-то одного режима работы, то их компенсация автоматически обеспечивается и при других режимах. Полярность добавочных полюсов зависит от направления вращения и режима работы машины. В генераторном режиме полярность добавочного полюса должна быть такой же, как у следующего за ним по направлению вращения главного полюса; в двигательном режиме — как у предшествующего ему по направлению вращения главного полюса. На рис. 6.38, б показано результирующее магнитное поле в воздушном зазоре машины с добавочными полюсами.

Сердечники добавочных полюсов изготавливают обычно массивными из стальной поковки, иногда применяют шихтованные сердечники из листов электротехнической стали. Шихтованные сердечники используют в случаях, когда ток якоря содержит переменные составляющие (двигатели пульсирующего тока и т.п.) и требуется, чтобы ЭДС e_k тоже содержала переменные составляющие, пропорциональные току якоря.

Значение индукции B_c под добавочным полюсом обычно мало, так как мало и среднее значение коммутирующей ЭДС $e_c = (3 \dots 10)$ В. Однако МДС обмотки добавочных полюсов должна быть очень большой, поскольку она направлена против поперечной составляющей $F_{aq} = \tau A$ МДС реакции якоря. Поэтому обмотка каждого полюса должна иметь добавочную МДС, определяемую по формуле

$$F_{доб} = \frac{B_c k_{\delta_{доб}} \delta_{доб}}{\mu_0} + 0,5 \tau A, \quad (6.39)$$

где B_c — индукция в воздушном зазоре под добавочными полюсами, которую вычисляют из соотношения (6.37) при условии $|e_c| = |e_{r1}|$; $k_{\delta_{доб}}$ и $\delta_{доб}$ — коэффициент воздушного зазора и значение зазора под добавочными полюсами.

При расчете МДС добавочных полюсов обычно не учитывается возможность получения ускоренной коммутации, так как требуемое ускорение достигается путем регулировки воздушного зазора при наладке машины. В связи с наличием значительной МДС $F_{доб}$ поток рассеяния добавочного полюса велик и превышает в 2—4 раза полезный поток, замыкающийся через якорь. Для уменьшения потока рассеяния, который может вызвать насыщение сердечника добавочного полюса, в крупных машинах кроме основного воздушного зазора делают второй зазор, устанавливая диамагнитные прокладки между сердечником добавочного полюса и ярмом.

При наличии компенсационной обмотки МДС добавочного полюса уменьшается, так как МДС компенсационной обмотки действует против МДС F_{aq} реакции якоря. Уменьшение МДС $F_{доб}$ позволяет сосредоточить витки обмотки добавочного полюса ближе к якорю, что способствует снижению потоков рассеяния. Ширину наконечника добавочного полюса в малых машинах выбирают равной ширине зоны коммутации: $b_{доб} = b_{лк}$. В больших машинах с напряженной коммутацией ширину наконечника добавочного полюса выбирают относительно малой: $b_{доб} = (0,3 \dots 0,6) b_{лк}$.

В некоторых машинах небольшой мощности создание коммутирующей ЭДС осуществляют за счет сдвига щеток с геометрической нейтральной $O-O$ на некоторый угол α на физическую нейтраль $O'-O'$ (рис. 6.39, а, б) так, чтобы коммутируемые секции оказались в зоне действия магнитного поля с индукцией $B_{рст}$, требуемого значения и направления. При этом достигают безыскровую работу машины только для одного направления вращения и при одной определенной нагрузке.

Необходимость обеспечения удовлетворительной коммутации накладывает определенные ограничения на габаритные размеры и конструкцию машин постоянного тока. Практика электромашиностроения показывает, что можно достичь безыскровую комму-

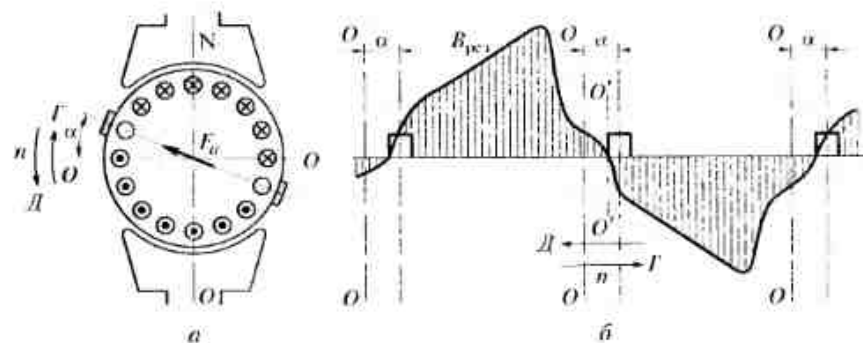


Рис. 6.39. Сдвиг щеток с геометрической нейтральной (а) и кривая магнитного поля при сдвиге щеток и отсутствии добавочных полюсов (б)

тацию лишь тогда, когда реактивная ЭДС в номинальном режиме не превышает некоторого предельного значения. Поэтому в крупных машинах большой мощности и машинах, работающих при высоких частотах вращения, применяют одновитковые секции и делают неглубокие пазы (не более 4...6 см в наиболее мощных машинах) для уменьшения индуктивности секции. В ряде случаев для снижения реактивной ЭДС приходится ограничивать активную длину якоря и его окружную скорость. Все эти меры приводят либо к снижению мощности машины при заданных габаритных размерах, либо к увеличению ее размеров и массы (при заданной мощности). Поэтому машины постоянного тока имеют меньшую мощность, чем машины переменного тока тех же габаритов; при мощности 100...1000 кВт это уменьшение составляет 20...25%. Попытки повысить мощность путем увеличения степени искрения на коллекторе приводят к резкому возрастанию эксплуатационных расходов. Условия коммутации ограничивают также предельную мощность, на которую можно построить машину постоянного тока (при заданной частоте вращения).

Для уменьшения влияния технологических отклонений и вибраций щеток на качество коммутации применяют обмотки с укороченным шагом и ступенчатые обмотки. В этих обмотках последняя секция паза одного слоя, заканчивая коммутацию, оказывается магнитно-связанной с секцией другого слоя, которая остается замкнутой щеткой. Вследствие этого под щеткой выделяется только часть электромагнитной энергии остаточного тока, другая часть энергии передается в короткозамкнутую секцию. Поскольку технологические отклонения равновероятны в ту и другую стороны, недокомпенсация реактивной ЭДС e_p сменяется перекompенсацией и поэтому накопления энергии не происходит. Коэффициент связи $k_{св} = M_c/L_c$ у секции с укороченным шагом достигает значения 0,4...0,6, благодаря чему существенно уменьшается ис-

крение под щетками. Однако при длительных нарушениях коммутации, когда погрешность $\Delta = \frac{|e_p| - |e_k|}{|e_p|}$ имеет один знак для трех— пяти пазов, последовательно заканчивающих коммутацию, взаимоиндуктивность указанных секций не имеет значения, так как коммутация секций одного паза не может улучшаться за счет коммутации секций другого паза. Преимуществом ступенчатых обмоток является также и то обстоятельство, что при их использовании происходит более равномерный износ коллектора, так как в пазу имеются две самостоятельные секции, а следовательно, электромагнитная энергия, выделяющаяся при разрыве остаточного тока паза, распределяется на две коллекторные пластины. Недостатком ступенчатых обмоток является сложность обеспечения «темной коммутации», так как условия коммутации двух самостоятельных секций требуют различного значения коммутирующей ЭДС. Таким образом, ступенчатые обмотки можно рекомендовать только при сложных условиях эксплуатации, характеризующихся работой с частыми нарушениями коммутации (голкообразная нагрузка и т.п.).

Уменьшению искрения способствует увеличение длины коллектора, однако это ведет к увеличению габаритных размеров и длины машины. Плотность тока под щетками не имеет существенного значения, однако не следует выбирать ее чрезмерной, так как при перегрузках возможен перегрев отдельных коллекторных пластин. Особенно опасно это явление для двигателей постоянного тока, работающих в условиях затяжных пусков. Во избежание перегрева отдельных пластин и возникновения деформации коллектора плотность тока под щетками при длительных нагрузках таких машин не должна превышать 20 А/см^2 .

На характер коммутации оказывает также влияние дифференциальный поток рассеяния, проходящий по коронкам зубцов, и поток главных полюсов. Дифференциальный поток рассеяния по коронкам зубцов Φ_{Δ} , замыкается через сердечник добавочного полюса. При вращении якоря изменяется положение середины паза с коммутируемыми секциями относительно сердечника (рис. 6.40), что приводит к изменению потока Φ_{Δ} и периодическому изменению индуктивности секции L_c . Реактивная ЭДС при этом может существенно отличаться от средней ЭДС e_p . В результате под щет-

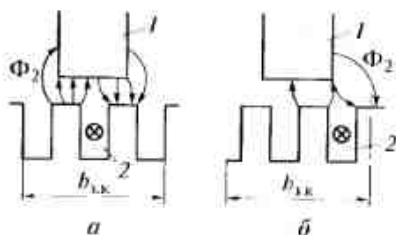
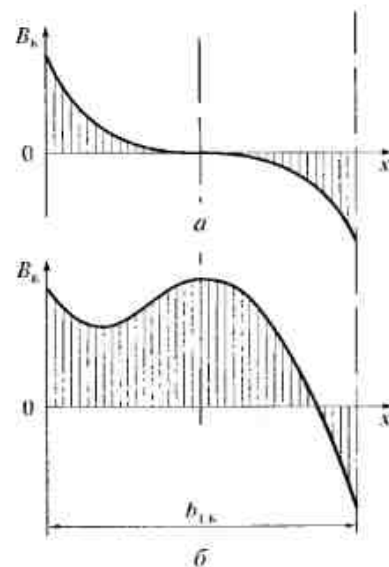


Рис. 6.40. Изменение дифференциального потока рассеяния, проходящего по коронкам зубцов, при перемещении паза с коммутируемыми секциями:

a — паз расположен под серединой добавочного полюса; b — паз расположен за краем добавочного полюса; 1 — сердечник добавочного полюса; 2 — паз

Рис. 6.41. Распределенные индукции B_x в зоне коммутации:
 a — созданной F_n главных полюсов; b — результирующей индукции B_x



ками возникает искрение. Для уменьшения дифференциального потока рассеяния целесообразно увеличивать зазор под добавочным полюсом.

Иногда, для того чтобы уменьшить скорость изменения потока Φ_{Δ} , наконечники добавочных полюсов устанавливают короткозамкнутые витки. Такой виток выполняют из меди или бронзы в виде фланца: он одновременно служит конструктивной деталью, крепящей катушку добавочного полюса. Однако, улучшая коммутацию в стационарных режимах, короткозамкнутые витки будут ухудшать коммутацию при резких изменениях тока якоря.

Влияние главных полюсов на процесс коммутации заключается в том, что поток Φ_{Δ} , созданный обмоткой возбуждения, частично попадет в зону коммутации. При симметричной магнитной системе и чередующейся полярности главных полюсов результирующий поток в зоне коммутации не изменяется. Но поле в зоне коммутации деформируется, усиливаясь, с одной стороны, и уменьшаясь, с другой. На рис. 6.41 показано распределение индукции B_x в зоне коммутации. Нарушение симметрии магнитного поля в зоне коммутации приводит к неблагоприятному характеру коммутации; при этом токосъем переносится на край щетки.

Более значительные расстройтва коммутации могут возникнуть вследствие нарушения магнитной симметрии машины, например в результате технологических отклонений при установке щеткодержателей, главных или добавочных полюсов когда изменяется поле в зоне коммутации. Чтобы уменьшить влияние поля главных полюсов на процесс коммутации, снижают значение по-

люсного перекрытия $\alpha = b/\tau$ так, чтобы соблюдалось условие $(1 - \alpha)\tau \geq 2,5b_{\text{лн}}$. В машинах малой мощности, кроме того, увеличивают ширину наконечника добавочного полюса, который экранирует зону коммутации от потока главного полюса. В машинах с компенсационной обмоткой МДС главных полюсов меньше, а следовательно, влияние поля главных полюсов на процесс коммутации меньше. Это позволяет несколько увеличить полюсную дугу, т.е. коэффициент полюсного перекрытия α .

Важную роль в процессе коммутации играют щетки, которые по своей физической природе являются нелинейными сопротивлениями. При быстром увеличении плотности тока под сбегющим краем щетки ее сопротивление резко возрастает, что ведет к уменьшению остаточного тока или полному его устранению даже в том случае, когда коммутация является неидеальной. В электрических машинах большой и средней мощности применяют электрографитированные щетки с большим падением напряжения в скользящем контакте (2,4...3,5 В на пару щеток). Такие щетки получают в электропечах путем нагревания заготовок из угля и кокса до температуры 2 000...2 500 °С, при этом они принимают структуру графита.

Соответствующим выбором марки щетки часто удается улучшить коммутацию машины. Основные правила, которыми руководствуются при выборе щеток, следующие:

- для быстроходных машин постоянного тока применяют мягкие щетки со средним значением падения напряжения под ними 1,5...2,0 В;

- для машин постоянного тока с затрудненной коммутацией используют твердые щетки с повышенным падением напряжения под ними 2,4...3,5 В;

- для контактных колец применяют металлографитные щетки с малым падением напряжения 0,1...0,5 В.

Технические характеристики наиболее часто используемых марок щеток и области их применения приведены в табл. 6.2.

При работе электрических машин в условиях повышенной вибрации и больших частотах вращения коллектора (свыше 1 500 мин⁻¹) давление на щетку может быть повышено до 50 кПа. Плотность тока под щеткой должна выбираться в зависимости от частоты вращения коллектора и условий коммутации для каждого типа электрической машины. Коэффициент трения щеток о коллектор принимается равным 0,25 для всех марок щеток.

Оценка коммутационной напряженности машины. Качество коммутации проверяют визуально или с помощью специальных приборов (индикаторов искрения) во время контрольных испытаний. Однако часто, чтобы составить прогноз работы машины при эксплуатации, необходимо оценить напряженность коммутации теоретически. Это необходимо как при проектировании машины, так

Тип щеток	Марка щеток	Переходное падение напряжения на пару щеток при рекомендуемой плотности тока, В	Плотность тока, А/см ²	Окружная скорость, м/с	Давление на щетку, кПа	Преимущественная область применения
Угольно-графитные	Г-20	2,9	15	40	50	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и коллекторные машины переменного тока
	Г-21	4,3	5	30	15	
	Г-22	2,5	10	30	40	
Графитные	Г-3	1,9	11	25	20—25	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации
	611М	2,0	12	40	20—25	
	611ОМ	2,0	15	90	12—22	
Электрографитированные	ЭГ2А	2,6	10	45	20—25	Генераторы и двигатели со средними и затрудненными условиями коммутации
	ЭГ2АФ	2,2	15	90	15—21	
	ЭГ4	2,0	12	40	15—20	
	ЭГ8	2,4	10	40	20—40	
	ЭГ14	2,5	11	40	20—40	
	ЭГ51	2,2	12	60	20—25	
	ЭГ61	3,0	13	60	35—50	
	ЭГ71	2,2	12	40	20—25	
	ЭГ74	2,7	15	50	17,5—25	
	ЭГ74Ф	2,3	15	60	15—21	
ЭГ85	2,3	15	50	17,5—35		
Металлографитные	М1	1,5	15	25	15—20	Низковольтные генераторы
	М3	1,8	12	20	15—20	
	М6	1,5	15	25	15—20	
	М20	1,4	12	20	15—20	
	МГ	0,2	20	20	18—23	
	МГ2	0,5	20	20	18—23	
	МГ4	1,1	15	20	20—25	
	МГ64	0,5	25	25	15—20	
	МГС0	0,2	20	20	18—23	
МГС5	2,0	15	35	20—25		

и при выборе типа машины для определенного технологического процесса, характеризующегося величиной и частотой перегрузок, вибрациями машины, частотой пусков, реверсов и т.п.

Наиболее распространенным критерием напряженности коммутации является среднее значение реактивной ЭДС, так как искрение возникает вследствие неполной ее компенсации. Однако определенного допустимого значения реактивной ЭДС установить не удастся, и различные заводы и фирмы придерживаются своих норм, ограничивая значение этой ЭДС 3...10 В.

Экспериментальная проверка коммутации и настройка добавочных полюсов. Машины постоянного тока на заводе проходят контрольные испытания, в которые входит и проверка качества коммутации (обычно визуальная). Головные образцы машин подвергаются более основательной проверке коммутации, в процессе которой путем изменения воздушных зазоров в магнитной цепи добавочных полюсов устанавливают оптимальное значение коммутирующей ЭДС.

Основным методом проверки и наладки коммутации является экспериментальное определение зоны безыскровой работы (путем подпитки обмотки добавочных полюсов). Для этого в обмотку добавочных полюсов от специального генератора (рис. 6.42, а) подают дополнительный ток ΔI (ток подпитки), вследствие чего изменяется значение МДС $F_{доб}$. При этом в зоне коммутации изменяются индукция B_k и коммутирующая ЭДС e_k . При проведении опыта, постепенно увеличивая МДС добавочных полюсов, добиваются появления искрения под щетками и фиксируют ток под-

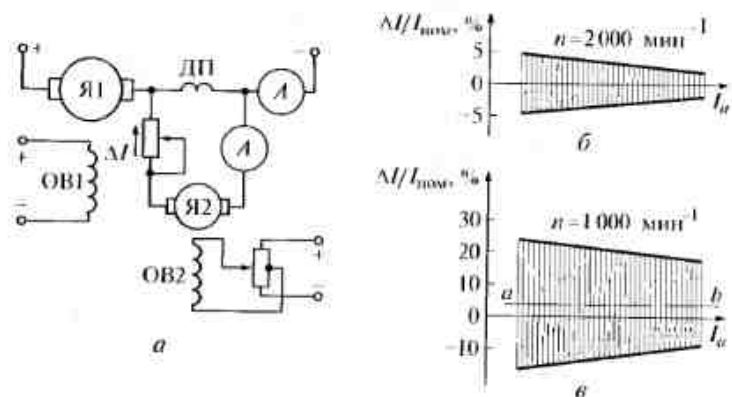


Рис. 6.42. Схема экспериментальной установки для определения зоны безыскровой работы (а) и вид этой зоны (б, в):

Я1 — якорь исследуемой машины; Я2 — якорь вспомогательного генератора; ОВ1 — обмотка возбуждения; ОВ2 — обмотка возбуждения вспомогательного генератора; ДП — обмотка добавочных полюсов; А — амперметр

питки $+\Delta I$. Затем изменяют направление тока подпитки и повторяют опыт, добиваясь снова появления искрения под щетками при токе $-\Delta I$. Этот опыт проводят при постоянной частоте вращения n и различных значениях тока якоря. По полученным данным строят зону безыскровой работы машины (заштрихованная зона на рис. 6.42, б). Обычно при построении зоны безыскровой работы значение тока подпитки ΔI выражают в процентах номинального тока якоря. Ширина зоны безыскровой работы характеризует устойчивость коммутации машины при случайных отклонениях условий коммутации от оптимальных, что всегда бывает в эксплуатации. При номинальном режиме предельная допустимая неточность компенсации реактивной ЭДС примерно равна половине ширины зоны безыскровой работы.

Как правило, добавочные полюсы настраивают так, чтобы середина зоны безыскровой работы соответствовала току подпитки, равному нулю. При этом режиме имеет место слегка ускоренная коммутация. Исключения составляют машины, работающие в широком диапазоне изменения частоты вращения. В этом случае также нужно настраивать добавочные полюсы по средней линии зоны безыскровой работы, но зону следует снимать при частоте вращения машины, близкой к максимальной (см. рис. 6.42, в). При такой настройке добавочных полюсов в области малых частот вращения машина недокоммутирована, т.е. поле в зоне коммутации слишком слабое (средняя линия ab зоны безыскровой работы на рис. 6.42, в находится в области положительных значений тока подпитки ΔI). Это объясняется тем, что при снижении частоты вращения уменьшается абсолютное значение реактивной ЭДС и увеличивается роль падения напряжения в переходном контакте между щеткой и коллектором, которое не зависит от частоты вращения. В результате резко расширяется область допустимой перекоммутации, т.е. можно было бы увеличить МДС добавочных полюсов. Несоответствие МДС добавочных полюсов оптимальному расположению зон безыскровой работы при малых частотах вращения не имеет практического значения, так как в рассматриваемых режимах машина менее нагружена в коммутационном отношении и имеет более устойчивую коммутацию, чем при большой частоте вращения.

6.9. Генераторы постоянного тока

По способу возбуждения генераторы постоянного тока подразделяют на *генераторы независимого возбуждения* и *генераторы с самовозбуждением*.

Генераторы независимого возбуждения подразделяют на генераторы, возбуждаемые электромагнитным путем, и генераторы с постоянными магнитами.

В зависимости от способа включения обмотки возбуждения генераторы с самовозбуждением бывают *параллельного возбуждения*, *последовательного возбуждения* и *смешанного возбуждения*.

На рис. 6.43 приведена принципиальная схема генератора независимого возбуждения. Ток возбуждения I_n зависит только от напряжения на зажимах цепи возбуждения и сопротивления этой цепи. Мощность, теряемая на возбуждение, обычно не превышает 1...3% мощности генератора. Независимое возбуждение достаточно широко распространено — оно применяется в машинах низкого напряжения (4...12 В), высокого напряжения (свыше 500 В), в машинах большой мощности, где требуется широкая регулировка напряжения.

На рис. 6.44 изображена принципиальная схема генератора параллельного возбуждения; обмотка возбуждения приключена к зажимам якоря. На схеме видно, что ток возбуждения I_n зависит от напряжения на зажимах якоря, а ток якоря $I_a = I_n + I_n$. Обычно ток I_n не превышает 2...3% значения номинального тока генератора. Самым распространенным типом генератора постоянного тока является генератор параллельного возбуждения, так как ему не нужен особый источник тока для возбуждения и в пределах нормальной нагрузки он обеспечивает устойчивое напряжение.

На рис. 6.45 приведена принципиальная схема генератора последовательного возбуждения. На схеме видно, что ток возбуждения $I_n = I_a$, т.е. зависит от нагрузки на генератор. В этом случае напряжение генератора изменяется в зависимости от тока нагрузки, тогда как обычно требуется, чтобы напряжение на зажимах генератора оставалось более или менее постоянным.

На рис. 6.46 представлена принципиальная схема генератора смешанного возбуждения. Генератор имеет две обмотки возбужде-

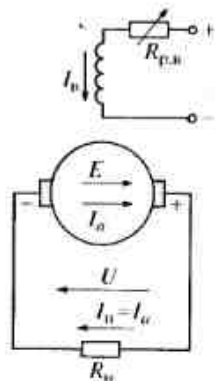


Рис. 6.43. Принципиальная схема генератора независимого возбуждения

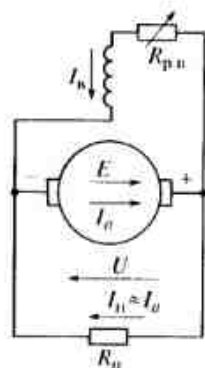


Рис. 6.44. Принципиальная схема генератора параллельного возбуждения

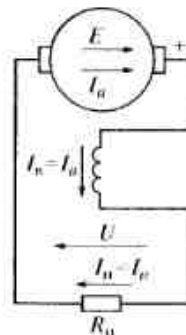


Рис. 6.45. Принципиальная схема генератора последовательного возбуждения

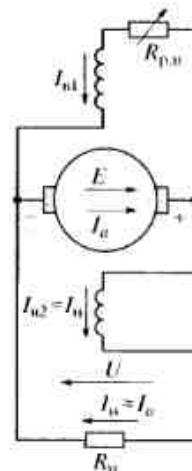


Рис. 6.46. Принципиальная схема генератора смешанного возбуждения

ния — параллельную и последовательную. Обычно не менее 70% МДС возбуждения дает параллельная обмотка. Наличие двух обмоток возбуждения позволяет получить почти постоянное напряжение на зажимах генератора.

Рассмотрим энергетическую схему, определим уравнение ЭДС и электромагнитный момент генератора. Пусть P_1 — мощность, подводимая к генератору от первичного двигателя. Если генератор не нагружен и не возбужден, то эта мощность тратится на покрытие только механических потерь $P_{мх}$, т.е. $P_1 = P_{мх}$.

Если генератор возбужден от независимого источника постоянного тока, но не нагружен ($I_a = 0$), то в нем, кроме механических потерь, возникают еще потери в стали якоря P_c . В этом случае $P_1 = P_{мх} + P_c = P_0$, где P_0 — потери при холостом ходе генератора.

Если нагрузить генератор, то вся мощность, за вычетом потерь P_0 , преобразуется в электромагнитную мощность $P_m = E_a I_a$. Таким образом,

$$P_m = E_a I_a = P_1 - P_0 \quad (6.40)$$

Полезная мощность P_2 , отдаваемая в сеть, меньше мощности P_m на величину потерь в меди обмотки якоря и всех последовательно соединенных с ней обмоток, а также в контакте щеток $P_{м2} + P_{ш}$. Следовательно,

$$P_2 = P_m - (P_{м2} + P_{ш}) \quad (6.41)$$

Добавочные потери не учитываются, так как они входят отчасти в потери при холостом ходе, частично в потери в меди. Энер-

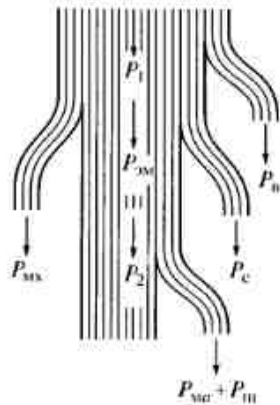


Рис. 6.47. Энергетическая схема генератора постоянного тока независимого возбуждения

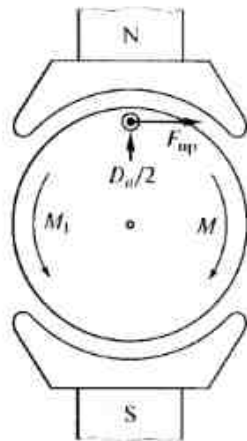


Рис. 6.48. Электромагнитный момент генератора

Энергетическая схема генератора постоянного тока независимого возбуждения приведена на рис. 6.47. Мощность P_m , необходимая для покрытия потерь в цепи возбуждения, не входит в мощность P_1 и показана на схеме отдельно от основного потока мощности.

Поскольку полезная мощность $P_2 = UI_a$, мощность $P_m = E_a I_a$, потери $P_{ms} + P_m = I_a^2 R_a$ (где R_a — сумма всех активных сопротивлений в цепи якоря, включая сопротивление контакта щеток), то уравнение электромагнитной мощности можно представить в следующем виде:

$$UI_a = E_a I_a - I_a^2 R_a \quad (6.42)$$

Сократив обе части уравнения (6.42) на I_a , получим

$$U = E_a - I_a R_a$$

или

$$E_a = U + I_a R_a \quad (6.43)$$

Уравнение (6.43) называется *уравнением ЭДС генератора*. Будем считать, что под действием момента M_1 первичного двигателя генератор приводится во вращение против часовой стрелки (рис. 6.48). В этом случае в проводнике обмотки якоря, находящемся под северным полюсом, индуцируется ЭДС и в том же направлении течет по нему ток I_a . Между магнитным полем и расположенным в нем проводником с током возникает сила F_{up} . Если проводник с током I представляет собой прямолинейный отрезок, имеющий длину l и расположенный в однородном магнитном поле ($B = \text{const}$) нормально к вектору магнитной индукции, то

$$F_{up} = BIl \quad (6.44)$$

Применительно к проводнику, изображенному на рис. 6.48, имеем: $B = B_a$, $l = l'$ и $I = i_a$. Следовательно, электромагнитный момент, создаваемый проводником на валу генератора определяется следующим выражением:

$$M_{up} = F_{up} D_a / 2 = B_a l' i_a D_a / 2 \quad (6.45)$$

Чтобы определить направление момента достаточно совместить основное магнитное поле и поле, созданное током в проводнике «пр» (рис. 6.49, а). Результирующее поле показано на рис. 6.49, б. В данном случае сила F_{up} , приложенная к проводнику, направлена слева направо, встречно относительно силы F_1 первичного двигателя, и следовательно, момент M_1 этого двигателя является по отношению к последнему тормозящим.

Чтобы определить полный электромагнитный момент генератора M , будем исходить из расчетной картины магнитного поля, представленной на рис. 6.50. Из рисунка следует, что момент создается только N'_a проводниками, расположенными на полюсной дуге $b' = \alpha / \tau$.

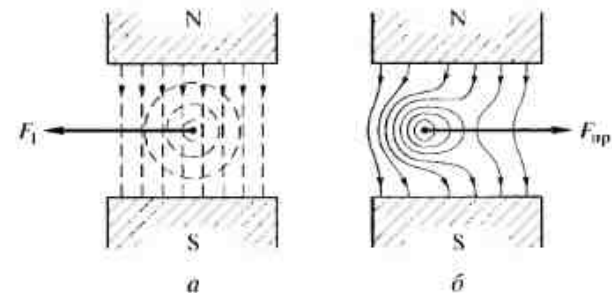


Рис. 6.49. Совмещение магнитных полей:

а — основного и от проводника с током; б — результирующего поля и электромагнитного усилия

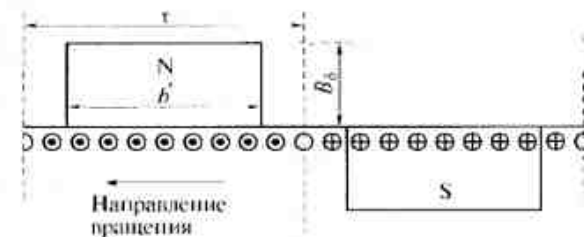


Рис. 6.50. Картина магнитного поля для расчета электромагнитного момента

Таким образом,

$$M = M_{\text{вр}} N'_a = B'_a l'_a \frac{D_a}{2} N'_a.$$

Учтем, что

$$\frac{D_a}{2} = \frac{\pi D_a}{2\pi} = \frac{2p\tau}{2\pi} \quad \text{и} \quad i_a = \frac{l_a}{2a},$$

тогда

$$M = \frac{p}{2\pi} \frac{N}{a} B'_a l'_a \tau i_a = \frac{p}{2\pi} \frac{N}{a} \Phi I_a. \quad (6.46)$$

Эту формулу можно записать в следующем виде:

$$M = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{a} p \Phi N I_a,$$

т.е. электромагнитный момент генератора пропорционален магнитному потоку p пар полюсов машины ($p\Phi$) и МДС якоря (NI_a).

В любой машине p , N и a заданы, следовательно,

$$M = C_m \Phi I_a,$$

где

$$C_m = (p/2\pi)(N/a). \quad (6.47)$$

Кроме тормозящего электромагнитного момента M на валу генератора существует второй тормозной момент — момент холостого хода M_0 , соответствующий мощности P_0 , которую нужно подвести к генератору при холостом ходе, чтобы покрыть потери холостого хода $P_{\text{вих}} + P_c$. По общему правилу

$$M_0 = \frac{P_0}{\omega} = P_0 \frac{2\pi n}{60}.$$

Если $n = \text{const}$, то полный тормозящий момент генератора определяется суммой $M + M_0 = M_t$. Между этим моментом и вращающим моментом M_1 первичного двигателя существует соотношение, определяемое законом равновесия моментов, согласно которому вращающий и тормозящий моменты генератора должны находиться во взаимном равновесии, т.е. должны быть равны друг другу по величине, но направлены в разные стороны.

Следовательно, при $n = \text{const}$

$$M_1 = -M_t = -(M + M_0). \quad (6.48)$$

Под M и M_0 можно понимать составляющие момента первичного двигателя, каждая из которых уравнивает соответствующий момент генератора. В этом случае

$$M_1 = M + M_0. \quad (6.49)$$

Характеристики генераторов. Свойства генераторов определяют по их характеристикам. Поскольку основным параметром, определяющим работу генератора, является напряжение U на его зажимах, то характеристики генераторов представляет собой зависимость напряжения U от тока возбуждения I_a , нагрузочного тока I и частоты вращения генератора n .

Наряду с этим имеет значение также зависимость тока возбуждения I_a от нагрузочного тока I при заданном характере изменения U , обусловленного требованиями эксплуатации генератора.

Генераторы чаще всего работают при постоянной частоте вращения, т.е. при $n = \text{const}$. Поэтому обычно представляют интерес следующие характеристики.

- **нагрузочные характеристики** — зависимости $U = f(I_a)$ при $I = \text{const}$ и $n = \text{const}$. В частном случае, когда $I = 0$, получаем характеристику холостого хода $U_0 = f(I_a)$, имеющую важное значение для оценки генератора и построения его других характеристик;

- **внешние характеристики** — зависимости $U = f(I)$ при $n = \text{const}$ и при $R_n = \text{const}$. Основное значение имеют две внешние характеристики: первая, когда номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$ имеется при номинальной нагрузке машины, а вторая, когда напряжение $U_{\text{ном}}$ соответствует холостому ходу;

- **регулирующие характеристики** — зависимости $I_a = f(I)$ при $n = \text{const}$ и при заданном характере изменения напряжения на зажимах U . Обычно считают, что $U = \text{const}$. К регулировочным характеристикам следует отнести и так называемую характеристику короткого замыкания, представляющую собой зависимость $I_k = f(I_a)$ при $n = \text{const}$ и $U = 0$. Эта характеристика наряду с характеристикой холостого хода имеет важное значение.

Рассмотрим характеристики генератора с независимым возбуждением.

Характеристика холостого хода — $U_0 = f(I_a)$ при $I = 0$ и $n = \text{const}$. Снятие характеристики следует начинать со значения $I_a = 0a$ (рис. 6.51), при котором напряжение $U_0 = ab$ превышает номинальное на 5...10%. После этого постепенно уменьшают ток возбуждения до $I_a = 0$, а затем изменяют его направление на обратное и снова увеличивают его до значения $0c = 0a$. Это дает нисходящую ветвь характеристики холостого хода $1-1$. Чтобы получить восходящую ветвь $2-2$ характеристики, достаточно повернуть ветвь $1-1$ на 180° вокруг точки O . На практике пользуются кривой $3-3$, проведенной посередине между ветвями $1-1$ и $2-2$ через точку O .

При холостом ходе и постоянной частоте вращения генератора имеем $U_0 \approx E \approx \Phi$. Следовательно, характеристика холостого хода, представляющая собой зависимость $U_0 = f(I_a)$, является также зависимостью $\Phi = f(I_a)$, т.е. представляет собой кривую намагничивания машины.

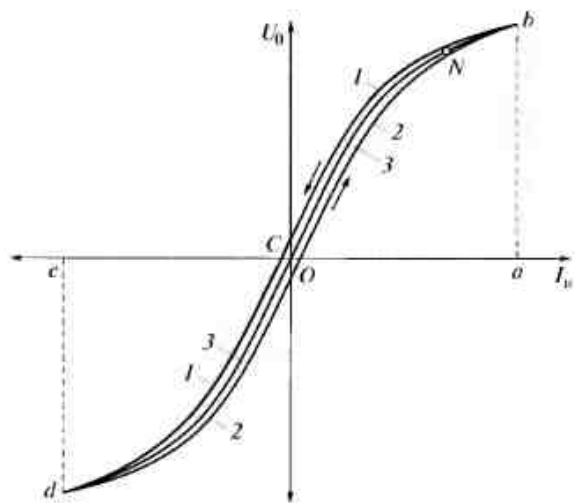


Рис. 6.51. Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения:

1...3 — ветви характеристик

По характеристике холостого хода можно судить о свойствах магнитной цепи машины. Точка C характеристики холостого хода при $I_u = 0$ свидетельствует о величине потока остаточного магнетизма $\Phi_{ост}$. Обычно $\Phi_{ост} = 2 \dots 5\%$ нормального потока машины Φ . Ветви 1—1 и 2—2 ограничивают некоторую площадь. Это объясняется явлением гистерезиса и свидетельствует о свойствах стали полюсов и ярма.

По положению на характеристике холостого хода точки N , соответствующей нормальной ЭДС, можно судить о степени насыщения магнитной цепи. Обычно эта точка лежит на перегибе кривой или так называемом «колене» кривой. Это объясняется тем, что работа на прямолинейной части кривой вызвала бы неустойчивое напряжение, а работа за перегибом, т. е. в насыщенной части кривой, ограничивала бы возможность регулирования напряжения.

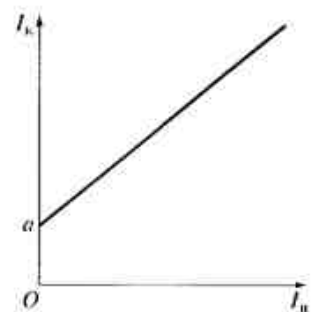


Рис. 6.52. Характеристика короткого замыкания генератора независимого возбуждения

Характеристика короткого замыкания — $I_k = f(I_u)$, при $U = 0$ и $n = \text{const}$. Эта характеристика снимается следующим образом. Зажимы якоря замыкают накоротко через амперметр и при токе возбуждения $I_u = 0$ вращают якорь с номинальной частотой вращения. В якоре индуцируется небольшая ЭДС от потока остаточного намагничивания, а в корот-

козамкнутой цепи якоря появляется ток $I_k = Oa$ (рис. 6.52). Увеличивая ток возбуждения I_u , можно довести значение тока I_k до $I_k = I_u$ (или $I_k = 1,25I_u$). Обычно характеристика короткого замыкания имеет вид прямой линии, так как при коротком замыкании машина не насыщена, следовательно, $E_a \approx I_u$. Пренебрегая переменным сопротивлением контакта щеток, можем считать, что $R_a = \text{const}$. Тогда $I_k \approx I_u$.

При заданных значениях частоты вращения n и тока возбуждения I_u режим короткого замыкания генератора определяется двумя факторами: падением напряжения в цепи якоря $I_a R_a$ и реакцией якоря. Треугольник короткого замыкания учитывает в графической форме оба эти фактора. Поскольку машина замкнута накоротко и $U = 0$, то $E_{ак} = I_a R_a$, где $E_{ак}$ — ЭДС, индуцируемая в генераторе при коротком замыкании. Для создания этой ЭДС нужен ток возбуждения I_{kR} , который можно определить, воспользовавшись начальным прямолинейным участком характеристики холостого хода (рис. 6.53, кривая 1). Задавшись током I_k , например $I_k = I_{ном}$, и измерив или подчитав сопротивление R_a , определяем $I_a R_a = E_{ак}$. Если на рис. 6.53 ЭДС $E_{ак} = Oa_1 = Aa$, то $I_{kR} = Oa$. Отрезок Aa представляет собой первую сторону треугольника короткого замыкания, учитывающую падение напряжения в машине. Чтобы определить реакцию якоря, нужно воспользоваться характеристикой короткого замыкания, построенной в той же координатной системе (рис. 6.53, кривая 2). Для тока $I_k = I_u = bC$ ток возбуждения $I_{kн} = OC$. Если бы в машине не было реакции якоря, то ток возбуждения был равен $I_{kR} = Oa$. Следовательно, разность $I_{кн} - I_{kR} = I_{ак} = aC = OC - Oa$ представляет собой вторую сторону треугольника короткого замыкания, учитывающую реакцию якоря в

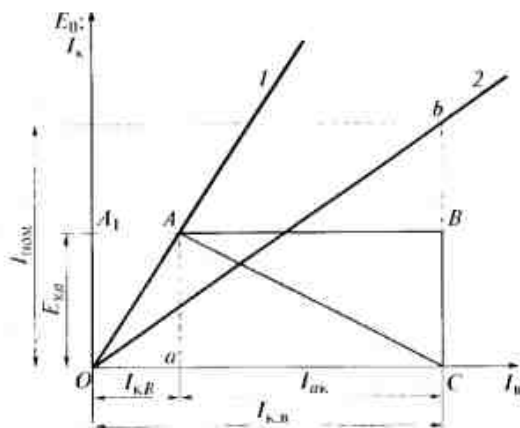


Рис. 6.53. Треугольник короткого замыкания:

1 — характеристика холостого хода; 2 — характеристика короткого замыкания

масштабе тока возбуждения. Соединив точки A и C , получим треугольник короткого замыкания AaC .

Рабочие характеристики генератора независимого возбуждения.
Внешняя характеристика — $U = f(I)$ при $I_u = \text{const}$ и $n = \text{const}$. Для снятия внешней характеристики следует привести генератор во вращение с номинальной частотой вращения и установить такой ток возбуждения I_u , чтобы при $I = I_u = O_c$ (рис. 6.54) иметь номинальное напряжение на зажимах генератора $U_u = Ca = OB$. Затем постепенно разгружают генератор до холостого хода. Напряжение на зажимах генератора растет и при $I = 0$ достигает значения $U_0 = OA$. Следовательно,

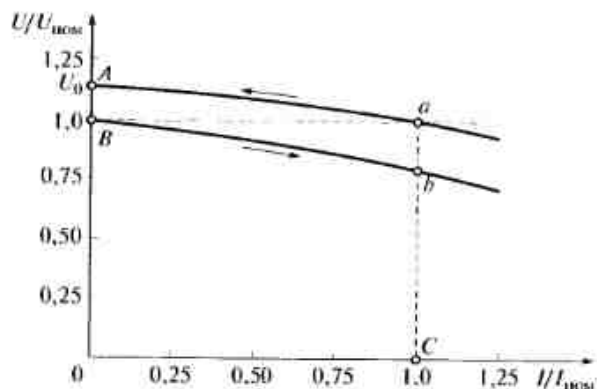


Рис. 6.54. Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения

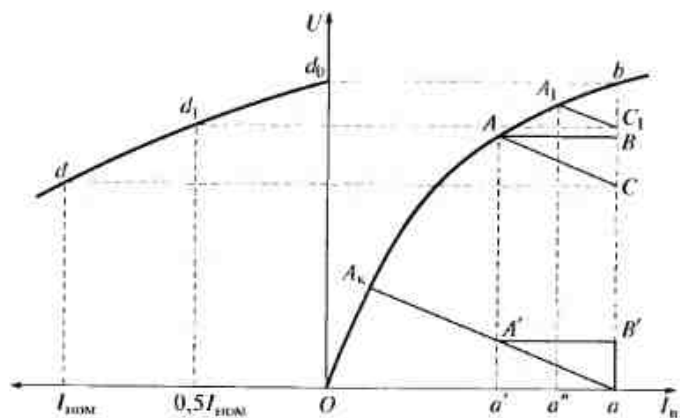


Рис. 6.55. Построение внешней характеристики генератора независимого возбуждения

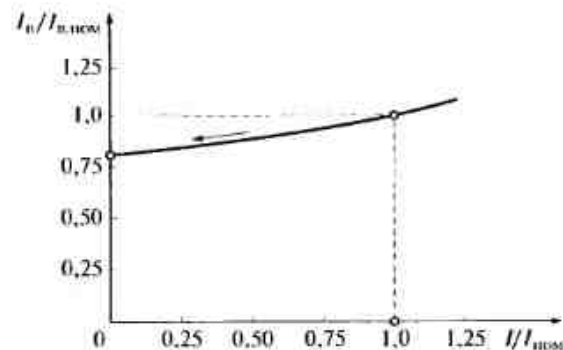


Рис. 6.56. Регулировочная характеристика генератора независимого возбуждения

$$\Delta U = \left(\frac{OA - OB}{OB} \right) 100 \% = \left(\frac{U_0 - U_{ном}}{U_{ном}} \right) 100 \% \quad (6.50)$$

Внешнюю характеристику можно построить, используя характеристику холостого хода и треугольник короткого замыкания.

Пусть ток возбуждения генератора I_u , остающийся величиной постоянной, задан отрезком Oa (рис. 6.55). Из точки a проведем прямую, параллельную оси ординат до пересечения с характеристикой холостого хода в точке b . Тогда $ab = E_{a0} = U_0$, где E_{a0} — ЭДС, а U_0 — напряжение на зажимах генератора при холостом ходе. Построим из точки a треугольник короткого замыкания $aA'B'$, соответствующий какому-нибудь току I , например $I = I_{ном}$. Катет $aB' = I_u R_a$ направим по линии ab и заставим треугольник $A'B'a$ скользить вдоль нее, параллельно самому себе до

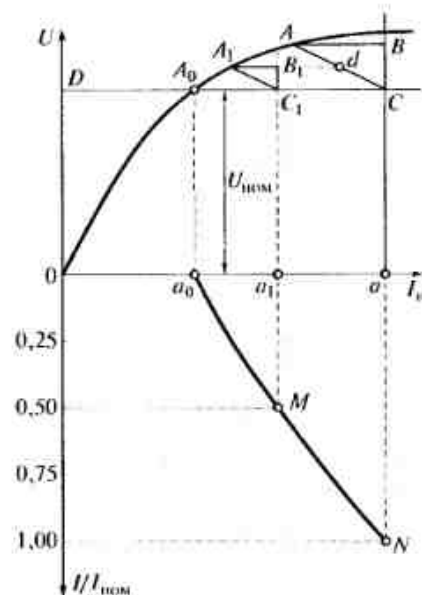


Рис. 6.57. Построение регулировочной характеристики генератора независимого возбуждения

тех пор, пока точка A' не попадет на характеристику холостого хода и треугольник $A'B'a$ не займет положение треугольника ABC . Отрезок Oa' представляет собой результирующую МДС машины, т. е. МДС основных полюсов Oa , уменьшенную на величину размагничивающей МДС якоря aa' . Отрезок $a'A = AB$ определяет ЭДС генератора при данной нагрузке, а отрезок $aC = aB - BC$ — напряжение на зажимах генератора U при $I = I_n$.

Чтобы получить напряжение U для других токов, например $I = 0,5I_{ном}$, нужно проделать то же построение, уменьшив все стороны треугольника короткого замыкания в 2 раза. Для простоты можно разделить отрезок aa' пополам, перенести точку a'' в точку A_1 на характеристике холостого хода и затем провести через эту точку прямую A_1C_1 параллельно гипотенузе AC . Отрезок A_1C_1 даст искомого напряжение U при $I = 0,5I_{ном}$.

Отложим в заданном масштабе токи $I = 0, 0,5I_{ном}, I_{ном}$ и т. д. влево от оси ординат и перенесем соответствующие им точки b_1, C_1, C в точки d_0, d_1, d . Тогда кривая d_0d_1d будет представлять собой внешнюю характеристику генератора.

Регулировочная характеристика — $I_n = f(U)$ при $U = \text{const}$ и $n = \text{const}$. Поскольку при уменьшении нагрузки напряжение на зажимах генератора растет, то, чтобы поддерживать его постоянным, нужно уменьшать ток возбуждения I_n . Примерная регулировочная характеристика показана на рис. 6.56. Ее можно построить так же, как внешнюю характеристику, по характеристике холостого хода и треугольнику короткого замыкания. Для этого проведем линию DC параллельно оси абсцисс на расстоянии $OD = U_{ном}$ от последней (рис. 6.57). Построив треугольник короткого замыкания ABC для какого-нибудь, например номинального, тока, расположим этот треугольник так, чтобы вершина A лежала на характеристике холостого хода, а вершина C — на прямой DC ; этим определяется необходимый для создания напряжения $U_{ном}$ ток возбуждения $I_{n,ном} = 0a$. Перенеся точку a вниз от оси абсцисс соответственно

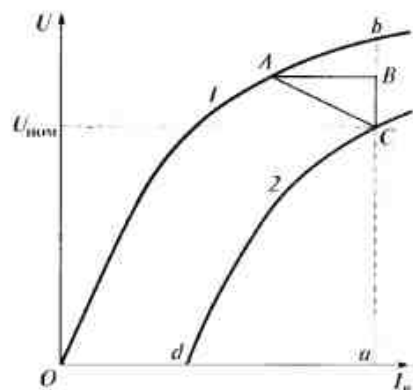


Рис. 6.58. Нагрузочная характеристика генератора независимого возбуждения: 1 — характеристика холостого хода; 2 — нагрузочная характеристика

току $I_{ном}$, получим точку N регулировочной характеристики, соответствующую номинальной нагрузке. Так же строят и другие точки регулировочной характеристики, например точка M для $I = 0,5I_{ном}$, при этом все стороны треугольника короткого замыкания изменяются пропорционально току I . Для холостого хода $I_{н0} = 0a_0$. Регулировочная характеристика определяется кривой NMa_0 .

Нагрузочные характеристики — $U = f(I_n)$ при $I = \text{const}$ и $n = \text{const}$. Напряжение на зажимах генератора всегда меньше ЭДС вследствие падения напряжения в якоре и реакции якоря. При $I = \text{const}$ действие этих двух факторов почти постоянно, поэтому нагрузочная характеристика (кривая 2 на рис. 6.58) расположена почти параллельно характеристике холостого хода. Так же, как и другие характеристики хода, нагрузочные можно построить по характеристике холостого и треугольнику короткого замыкания. Поскольку $I = \text{const}$, то при построении нужно перемещать треугольник короткого замыкания ABC параллельно самому себе, скользя вершиной A по характеристике холостого хода (см. рис. 6.58).

Характеристики генератора параллельного возбуждения. Генератор параллельного возбуждения (см. рис. 6.42) работает с самовозбуждением. Для этого необходимо, чтобы в генераторе был небольшой (2...5% номинального) поток остаточного намагничивания $\Phi_{ост}$. Если, замкнув цепь возбуждения, привести генератор во вращение с некоторой, например, номинальной частотой вращения, то на его зажимах появится небольшое напряжение и по цепи возбуждения потечет ток, который создает добавочный поток намагничивания $\Phi_{доб}$. В зависимости от направления тока в обмотке возбуждения поток $\Phi_{доб}$ может быть направлен либо встречно относительно потока $\Phi_{ост}$, либо согласно с ним. Генератор может самовозбудиться только при согласном направлении обоих потоков. Другими словами, процесс самовозбуждения генератора может идти в одну сторону, определяемую направлением потока $\Phi_{ост}$.

При согласном направлении обоих потоков результирующий поток возбуждения увеличивается; это приводит к увеличению индуцируемой в якоре ЭДС и, в свою очередь, вызывает дальнейшее увеличение тока и потока возбуждения.

Выясним предел, до которого идет процесс самовозбуждения. При этом будем считать, что генератор работает вхолостую, т. е. $I = 0$. При самовозбуждении уравнение ЭДС цепи возбуждения можно записать в следующем виде:

$$u_0 = I_n R_n + \frac{d(L_n I_n)}{dt}, \quad (6.51)$$

или

$$u_0 - I_n R_n = \frac{d(L_n I_n)}{dt}, \quad (6.52)$$

где u_0 — переменное напряжение на зажимах генератора и, следовательно, на зажимах цепи возбуждения; R_n — сопротивление цепи возбуждения; L_n — индуктивность цепи возбуждения.

Если $R_n = \text{const}$, то падение напряжения $I_n R_n$ изменяется прямо пропорционально току I_n . Графически оно изображается прямой 1 на рис. 6.59, идущей под углом α к оси абсцисс, причем

$$\operatorname{tg} \alpha = I_n R_n / I_n = R_n. \quad (6.53)$$

Следовательно, каждому значению R_n соответствует прямая, выходящая из начала координат под углом, определяемым формулой (6.53). На рис. 6.59 характеристика холостого хода изображена кривой 2. Отрезки ординат между кривыми 2 и 1 дают разность $u_0 - I_n R_n = d(L_n I_n)/dt$ и служат мерой интенсивности происходящего процесса самовозбуждения. Очевидно, что этот процесс окончится тогда, когда разность $u_0 - I_n R_n$ станет равна нулю, другими словами, когда характеристики 1 и 2 пересекутся. Таким образом, установившееся значение тока I_n определяется точкой пересечения А характеристик 1 и 2.

Если увеличивать сопротивление R_n , т. е. угол α (кривые 3 и 4) то точка А будет скользить по характеристике холостого хода в направлении к точке О. При некотором сопротивлении $R_{n, \text{кр}}$, которое называется критическим сопротивлением, прямая 1 будет касательной к начальной части характеристики холостого хода

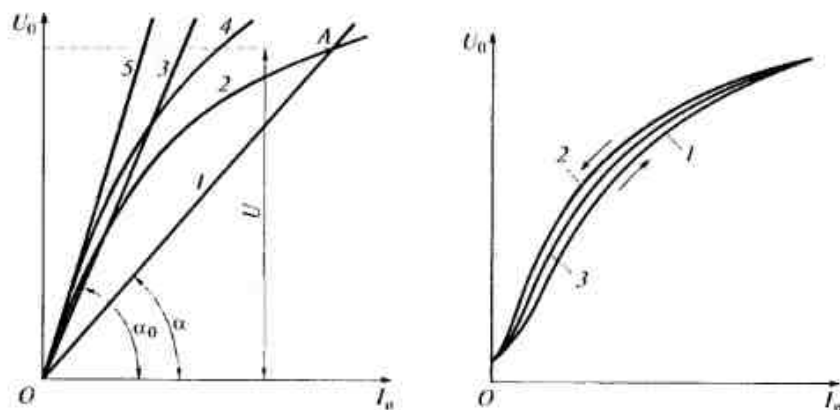


Рис. 6.59. Графическое обоснование самовозбуждения генератора параллельного возбуждения:

1, 3, 5 — зависимости U_0 от I_n при различных значениях R_n ; 2, 4 — характеристики холостого хода при различных значениях n .

Рис. 6.60. Характеристика холостого хода генератора параллельного возбуждения:

1 — при увеличении тока I_n ; 2 — при уменьшении тока I_n ; 3 — усредненная

(рис. 6.59, прямая 3). В этих условиях генератор практически не возбуждается.

Поскольку при заданных масштабах напряжения u_0 и тока I_n наклон характеристики холостого хода зависит от частоты вращения якоря, то очевидно, что каждой из них соответствует свое критическое сопротивление $R_{n, \text{кр}}$. Так, например, для характеристики холостого хода 4, соответствующей большей частоте вращения, критическое сопротивление определяется прямой 5.

Характеристика холостого хода — $U_0 = f(I_n)$ при $I = 0$ и $n = \text{const}$. Эта характеристика снимается так же, как и при независимом возбуждении. Однако самовозбуждение генератора параллельного возбуждения возможно только в одном направлении. Поэтому характеристику холостого хода этого генератора можно снять тоже только при одном направлении тока возбуждения (рис. 6.60).

Поскольку при холостом ходе генератора параллельного возбуждения по его якорю течет ток $I_a = I_n$, то в генераторе появляется реакция якоря и возникает падение напряжения. Но ток I_n обычно не превышает 2...3% $I_{\text{ном}}$. Поэтому характеристика холостого хода, снятая при самовозбуждении, практически совпадает с соответствующей характеристикой при независимом возбуждении.

Внешняя характеристика — $U = f(I)$ при $R_n = \text{const}$ и $n = \text{const}$. На рис. 6.61 кривая 1 представляет собой внешнюю характеристику генератора параллельного возбуждения, а кривая 2 — внешнюю характеристику этого генератора при работе с независимым возбуждением. При работе с самовозбуждением падение напряжения с увеличением нагрузки происходит быстрее. Это объясняется тем, что при увеличении нагрузки генератора параллельного возбуждения, кроме реакции якоря и падения напряжения в якорю, еще имеет место уменьшение тока возбуждения $I_n = U/R_n = U$, которое влечет за собой уменьшение потока и соответствующее уменьшение ЭДС и напряжения на зажимах генератора.

На рис. 6.61 видно, что если увеличить нагрузку сверх номинальной в генераторе независимого возбуждения, то изменение напряжения пойдет по линии 2; при коротком замыкании ($U_k = 0$)

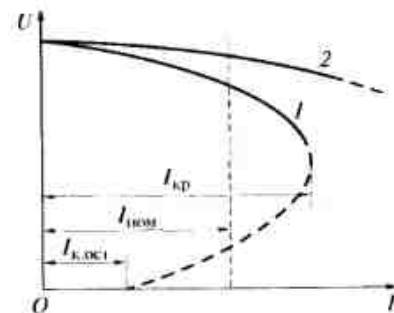


Рис. 6.61. Внешние характеристики генератора:

1 — параллельного возбуждения; 2 — независимого возбуждения.

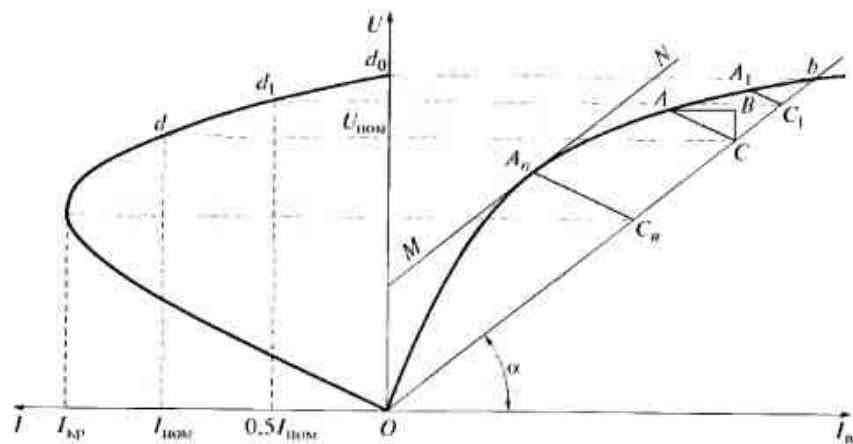


Рис. 6.62. Построение внешней характеристики генератора параллельного возбуждения

ток в якоре I_k будет недопустимо большой и может повредить обмотку якоря.

При работе с самовозбуждением (см. рис. 6.61, кривая 1) ток нагрузки будет увеличиваться только до критического значения $I_{кр}$, обычно не превышающего номинальный ток больше чем в 2—2,5 раза, а затем ток I начинает уменьшаться. При коротком замыкании $U=0$ и $I_n=0$, а по якору течет ток $I_{к.ост}$, определяемый только потоком $\Phi_{ост}$. Обычно $I_{к.ост} < I_{ном}$. Следовательно, для генератора параллельного возбуждения замыкание опасно главным образом с точки зрения коммутационных условий при переходе через критический ток, но все же оно менее опасно, чем для генератора независимого возбуждения.

Повышение значения напряжения ΔU от номинального до напряжения холостого хода на зажимах генератора параллельного возбуждения гораздо больше, чем в генераторе независимого возбуждения и в зависимости от степени насыщения машины достигает 30...35% и более.

Построение внешней характеристики генератора параллельного возбуждения выполняется так же, как для генератора независимого возбуждения, с той лишь разницей, что в генераторе независимого возбуждения ток возбуждения i_n не зависит от напряжения на зажимах генератора U , а в генераторе самовозбуждения ток I_n изменяется пропорционально напряжению U . Соответственно этому зависимость $I_n = f(U)$ изображается на рис. 6.55 прямой ab , параллельной оси ординат, а на рис. 6.62 — прямой Ob , проведенной из начала координат под углом α , причем $\text{tg } \alpha = R_v$. Поэтому треугольник короткого замыкания ABC в первом случае поме-

щается между характеристикой холостого хода и прямой ab , а во втором — между той же характеристикой и прямой Ob .

Слева от оси ординат на рис. 6.62 построена внешняя характеристика по точкам для $I=0$, $I=0,5I_{ном}$ и $I=I_{ном}$. Чтобы получить критический ток $I_{кр}$, нужно провести к характеристике холостого хода касательную MN параллельно прямой Ob и в точке касания A_n провести прямую $A_n C_n$ параллельно гипотенузе AC треугольника ABC . Тогда $I_{кр} = I_{ном}((A_n C_n)/AC)$.

Регулировочные характеристика для генераторов с независимым и параллельным возбуждением одинаковы. Это же относится и к нагрузочным характеристикам.

Генератор последовательного возбуждения. Поскольку в генераторе последовательного возбуждения обмотка возбуждения соединена последовательно с якром (см. рис. 6.45), то ток возбуждения этого генератора равен току нагрузки I . Следовательно, характеристика холостого хода генератора и его нагрузочные характеристики можно снять только по схеме с независимым возбуждением. Для этого нужно отсоединить обмотку возбуждения от якоря и питать ее от постороннего источника постоянного тока. Характеристики имеют вид, показанный на рис. 6.51.

При независимом возбуждении снимается и характеристика короткого замыкания. По ней можно построить треугольник короткого замыкания (см. рис. 6.53). Имея характеристику холостого хода и треугольник короткого замыкания, можно построить внешнюю характеристику, т.е. зависимость $U = f(I)$ при $n = \text{const}$. Действительно, пусть кривая 1 на рис. 6.63 представляет собой характеристику холостого хода. Построим из точки C' на оси абсцисс треугольник короткого замыкания $A'B'C'$ для какого-нибудь тока нагрузки, например $I = I_{ном}$, и будем перемещать его параллельно оси ординат до тех пор, пока он не займет положение треугольника ABC с вершиной A на характеристике холостого хода. Тогда точка C будет точкой внешней характеристики. Будем считать, что стороны треугольника $A'B'C'$ изменяются пропорцио-

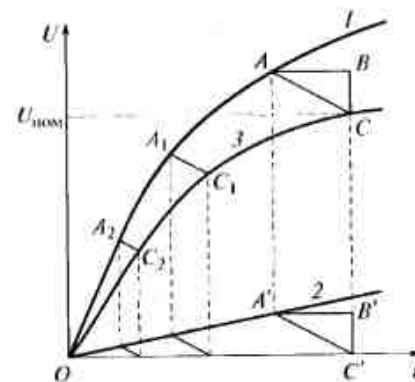


Рис. 6.63. Построение внешней характеристики генератора последовательного возбуждения:

1 — характеристика холостого хода; 2 — геометрическое место точек A' ; 3 — внешняя характеристика

нально току I . Тогда геометрическое место точек A' определяется прямой 2. Аналогичное построение производим для других токов, например $I = 0,5I_{ном}$ и $0,25I_{ном}$.

Соединив точки C , C_1 и C_2 , получим кривую 3, представляющую собой внешнюю характеристику генератора последовательного возбуждения.

Генератор смешанного возбуждения. Поскольку генератор смешанного возбуждения имеет параллельную и последовательную обмотки возбуждения, то он совмещает в себе свойства генераторов обоих типов. Обычно обе обмотки включаются согласно, причем параллельная обмотка создает номинальное напряжение на зажимах генератора смешанного возбуждения при его холостом ходе, а последовательная компенсирует МДС реакции якоря и падение напряжения в якоре при определенной нагрузке. Этим достигается автоматическое регулирование напряжения генератора в определенных пределах нагрузки.

Зная характеристики генераторов параллельного и последовательного возбуждения, легко объяснить характеристики генератора смешанного возбуждения. Так, например, при холостом ходе ток нагрузки, а следовательно, и ток последовательной обмотки равны нулю. Поэтому характеристика холостого хода генератора смешанного возбуждения ничем не отличается от соответствующей характеристики генератора параллельного возбуждения.

Нагрузочные характеристики генератора смешанного возбуждения имеют тот же вид, что и соответствующие характеристики генератора параллельного возбуждения или генератора независимого возбуждения, но они могут располагаться выше характеристики холостого хода, поскольку в генераторе смешанного возбуждения напряжение U при нагрузке может быть больше (при перекompенсации), чем при холостом ходе.

Наибольший интерес представляет собой внешняя характеристика генератора смешанного возбуждения, т. е. зависимость $U = f(I)$ при $n = \text{const}$ и $R_a = \text{const}$. Рассчитаем последовательную обмотку генератора так, чтобы она могла скомпенсировать реакцию якоря и падение напряжения в якоре при $I = I_{ном}$. В этом случае генератор называется нормально компенсированным, его внешняя характеристика имеет вид кривой 1, представленной на рис. 6.64. Однако чаще приходится поддерживать постоянным напряжение не на зажимах генератора, а у приемников электроэнергии, для чего нужно добавочно скомпенсировать падение напряжения в линии. В этом случае генератор называется перекompенсированным и его внешняя характеристика приобретает вид кривой 2, изображенной на рис. 6.64. Для сравнения на рис. 6.64 также показаны внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения (кривая 3) и внешняя характеристика генера-

Рис. 6.64. Внешние характеристики генератора смешанного возбуждения:

1 — нормально компенсированного; 2 — перекompенсированного; 3 — внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения; 4 — внешняя характеристика генератора смешанного возбуждения с противовключением

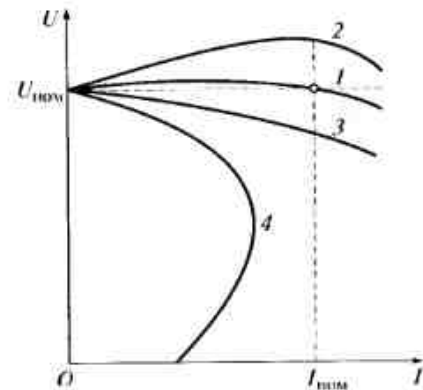
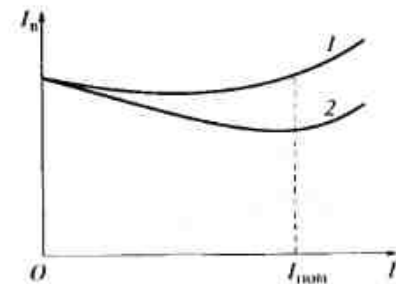


Рис. 6.65. Регулировочные характеристики генератора смешанного возбуждения

1 — нормально компенсированного; 2 — перекompенсированного



тора смешанного возбуждения с противовключением, т. е. встречным включением обеих обмоток возбуждения (кривая 4).

Соответственно внешним характеристикам 1 и 2, приведенным на рис. 6.64, регулировочные характеристики генератора смешанного возбуждения имеют вид кривых 1 и 2, представленных на рис. 6.65.

Генераторы смешанного возбуждения применяют в случаях, когда нужно поддерживать постоянное напряжение U при резко переменной нагрузке.

6.10. Двигатели постоянного тока

В зависимости от способа подключения обмотки возбуждения к обмотке якоря различают следующие типы двигателей: параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.

На рис. 6.66 изображена энергетическая схема двигателя параллельного возбуждения при $n = \text{const}$. Полная электрическая мощность, подводимая к двигателю из сети, равна

$$P_1 = UI = U(I_a + I_b), \quad (6.54)$$

где U — напряжение на зажимах двигателя; I_a — ток в якоре; I_b — ток возбуждения.

Часть мощности P_1 тратится на покрытие потерь в цепи возбуждения $P_w = UI_n$ и потерь в цепи якоря $P_{\text{ма}} + P_m = I_a^2 R_a$. Остальная мощность преобразуется в электромагнитную мощность $P_{\text{эм}} = E_a I_a$. Следовательно,

$$P_{\text{эм}} = E_a I_a = P_1 - UI_n - (P_{\text{ма}} + P_m) = UI_a - I_a^2 R_a \quad (6.55)$$

Полезная механическая мощность P_2 , отдаваемая двигателем, меньше мощности $P_{\text{эм}}$ на величину мощности P_0 , необходимой для покрытия потерь холостого $P_0 = P_{\text{мх}} + P_c$, т.е.

$$P_2 = P_{\text{эм}} - P_0 = P_{\text{эм}} - (P_{\text{мх}} + P_c) \quad (6.56)$$

Предположим, что к зажимам $A-B$ двигателя, приведенного на рис. 6.67, подведено напряжение U . При принятых на рисунке полярности полюсов и направлении тока в обмотке якоря на валу двигателя создается вращающий электромагнитный момент M , направленный против часовой стрелки. Если этот момент достаточно велик, то двигатель начнет вращаться в направлении момента с некоторой частотой вращения n , при этом якорь двигателя будет пересекать линии поля полюсов. Применяя правило правой руки, можно убедиться в том, что ЭДС, индуцируемая в проводнике обмотки якоря, направлена встречно относительно тока и, стало быть, относительно подведенного к двигателю напряжения U . Это очевидно для любых условий работы двигателя. На этом основании ЭДС $E_a = C_p n \Phi$, индуцируемая в обмотке якоря двигателя при его вращении, называется *обратной* ЭДС. Зависимость между подводимым напряжением U и обратной ЭДС вытекает из закона равновесия ЭДС, согласно которому подве-

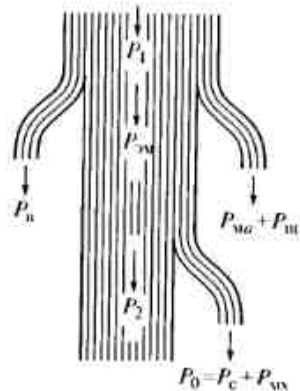


Рис. 6.66. Энергетическая схема двигателя параллельного возбуждения при $n = \text{const}$

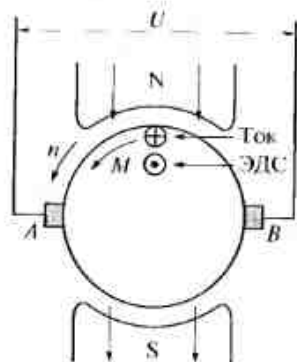


Рис. 6.67. Момент и ЭДС двигателя постоянного тока

денное к двигателю напряжение сети должно уравниваться совокупностью развивающихся в двигателе обратных ЭДС.

Будем считать, что двигатель работает в установившемся режиме, т.е. его ток I_a , поток Φ и частота вращения n заданы и не изменяются по величине.

В этих условиях в двигателе существуют две обратные ЭДС: $E_a = C_p n \Phi$ и ЭДС равная $(-I_a R_a)$. По закону равновесия ЭДС сумма $E_a + I_a R_a$ должна быть равна по величине напряжению сети U , но направлена встречно:

$$U = -(E_a + I_a R_a) \quad (6.57)$$

Знак «-» показывает, что ЭДС E_a действует встречно относительно напряжения U .

Поэтому его обычно опускают и записывают уравнение (6.57) в виде

$$U = E_a + I_a R_a \quad (6.58)$$

Уравнение ЭДС двигателя можно вывести и из уравнения (6.55). Перепишем уравнение (6.55) в виде

$$UI_a = P_{\text{эм}} + I_a^2 R_a = E_a I_a + I_a^2 R_a \quad (6.59)$$

где UI_a — подводимая к якорю двигателя мощность; $P_{\text{эм}}$ ($P_{\text{эм}} = E_a I_a$) и $I_a^2 R_a$ — составляющие этой мощности, из которых первая преобразуется в механическую мощность, а вторая идет на покрытие потерь в цепи якоря.

Разделив обе части уравнения (6.59) на I_a , получим формулу (6.58).

При $n = \text{const}$ в двигателе действуют три момента:

- вращающий электромагнитный момент M ;
- полезный тормозной момент M_2 , обусловленный рабочей машиной, на которую работает двигатель;
- тормозной момент при холостом ходе M_0 , обусловленный всеми видами трения в двигателе и потерями в его стали.

Закон равновесия моментов формулируется аналогично закону равновесия ЭДС:

$$M = -(M_2 + M_0) \quad (6.60)$$

Обычно говорят не о тормозных моментах, а о составляющих, которые находятся в равновесии с соответствующим тормозным моментом, в этом случае

$$M = M_2 + M_0 \quad (6.61)$$

Уравнение моментов можно вывести и из уравнения мощностей (6.56).

Перепишем уравнение (6.56) в следующем виде:

$$P_{\text{эм}} = P_2 + P_0$$

Разделив обе части этого уравнения на угловую частоту вращения якоря $\omega = 2\pi(n/60)$ и приняв во внимание, что $P_{эм}/\omega = M$; $P_2/\omega = M_2$ и $P_0/\omega = M_0$, получим уравнение (6.61).

Поскольку $P_{эм} = E_a I_a$, имеем

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega} = \frac{E_a I_a}{\omega} = \frac{pn}{60} \frac{N}{a} \Phi I_a = \frac{p}{2\pi} \frac{N}{a} \Phi I_a = C_{эв} \Phi I_a. \quad (6.62)$$

Если частота вращения двигателя изменяется, то одновременно с этим изменяются ток в якоре и поток возбуждения. Поэтому следует иметь в виду мгновенные значения тока в якоре i_a и ЭДС e_a .

Кроме того, в цепи якоря возникает ЭДС самоиндукции

$-\frac{d(L_a i_a)}{dt}$ (L_a — индуктивность цепи якоря). Соответственно в подводимом к двигателю напряжении должна быть составляющая $+\frac{d(L_a i_a)}{dt}$, уравновешивающая ЭДС самоиндукции. Обычно $L_a = \text{const}$, следовательно,

$$U = e_a + i_a R_a + L_a (di_a/dt). \quad (6.63)$$

При $n \neq \text{const}$ вращающий момент двигателя имеет, кроме составляющих M_2 и M_0 , еще третью составляющую — динамический момент M_f , уравновешивающий соответствующий момент, обусловленный моментом инерции J всех связанных с якорем двигателя вращающихся масс.

Следовательно,

$$M = M_2 + M_0 + M_f. \quad (6.64)$$

Если считать, что $J = \text{const}$, то

$$M_f = J(d\omega)/(dt). \quad (6.65)$$

Чтобы подчеркнуть различие отдельных моментов, формулу (6.64) записывают в следующем виде:

$$M = M_{ст} + M_f, \quad (6.66)$$

где $M_{ст} = M_2 + M_0$ — статический момент двигателя, существующий при любом режиме работы двигателя, тогда как момент M_f возникает только при изменении скоростей, т.е. в переходных режимах.

Обычно $M_2 \geq M_0$, поэтому $M_{ст}$ определяется в основном моментом M_2 , т.е. статическим моментом рабочей машины, пересчитанным на угловую частоту вращения двигателя ω . Статиче-

ский момент рабочей машины создается статическими силами трения, веса, резания, скручивания и может либо оставаться во время работы практически постоянным ($M_{ст} = \text{const}$), либо изменяться в зависимости от частоты вращения, длины пути и т.д. Статический момент рабочей машины не всегда оказывает тормозящее действие в отношении электродвигателя, а в зависимости от направления вращения последнего может оказать и движущее воздействие.

Так, например, при подъеме груза краном вес груза G противодействует вращению электродвигателя, тогда как при спуске, наоборот, способствует ему. Такое же действие оказывает растяжение, сжатие или скручивание входящих в систему электропривода упругих тел.

Динамический момент M_f возникает при всяком нарушении равновесия между моментами M и $M_{ст}$. При установившемся режиме $M = M_2 + M_0 = M_{ст}$. Если почему-либо момент M превысит $M_{ст}$ ($M > M_{ст}$), то на валу двигателя появляется положительный динамический момент и частота вращения двигателя начнет возрастать.

При $M < M_{ст}$ процесс проходит в обратном направлении.

Свойства двигателей постоянного тока определяются по совокупности трех видов характеристик: *пусковых, рабочих и регулировочных*.

Пусковые характеристики определяют пусковую операцию от момента пуска двигателя до момента перехода к установившемуся режиму работы.

К ним относятся: пусковой ток $I_{п}$, выраженный обычно отношением $I_{п}/I_{ном}$; пусковой момент $M_{п}$, определяемый отношением $M_{п}/M_{ном}$; время пуска $t_{п}$; экономичность операции, оцениваемая количеством затраченной при пуске энергии, стоимостью и надежностью пусковой аппаратуры.

Рабочие характеристики определяют свойства двигателя при установившемся режиме работы. К ним относятся зависимости n , M , I_a , $\eta = f(P_2)$ при $U = U_{ном} = \text{const}$, а также механическая характеристика $n = f(M)$.

Регулировочные характеристики определяют свойства двигателей при регулировании частоты вращения.

К ним относятся:

пределы регулирования, определяемые отношением $n_{\text{max}}/n_{\text{мин}}$; экономичность регулирования с точки зрения первоначальных затрат на оборудование и последующих эксплуатационных расходов; характер регулирования — плавный или ступенчатый, простота и надежность регулировочной аппаратуры и операций по регулированию частоты вращения.

Используют следующие способы пуска двигателей: прямое включение, реостатный способ пуска (при котором в цепь якоря

включается пусковой реостат) и изменение подводимого к двигателю при пуске напряжения.

С точки зрения дешевизны и простоты пусковой операции, прямое включение двигателя на полное напряжение сети является самым выгодным.

В этом случае пусковая операция сводится к простому замыканию пускателя в цепи якоря, при этом двигатели параллельного и смешанного возбуждения обычно предварительно возбуждаются.

Однако данный способ имеет ряд весьма существенных недостатков, определяемых в основном значительным броском пускового тока в начальной стадии пусковой операции. На коллекторе двигателя может возникнуть круговой огонь; в случае затяжной операции наблюдается чрезмерное повышение температуры всех обмоток в цепи якоря; работа защитной и измерительной аппаратуры в цепи якоря усложняется, происходит значительное падение напряжения в питающей двигатель сети, если она не рассчитана на пусковой бросок тока; на валу двигателя возникает большой момент ускорения, на который должен быть рассчитан передаточный механизм к рабочей машине.

Чтобы уменьшить бросок тока при пуске, в цепь якоря двигателя включают пусковой реостат.

Пуск в ход требует некоторого времени t_n . Для двигателей мощностью до 200 кВт, пускаемых под полной нагрузкой, время пуска, с, можно рассчитать по следующей эмпирической формуле:

$$t_n = 4 + 2\sqrt{P_{ном}}$$

где $P_{ном}$ — в кВт.

Средняя мощность при пуске определяется произведением номинального напряжения $U_{ном}$ на средний пусковой ток I_n , а энергия, затраченная за время пуска t_n , произведением $U_{ном}I_n t_n$.

В установках большой мощности пусковой реостат громоздкий и характеризуется значительными потерями энергии особенно при частых пусках в ход.

Поэтому в ряде установок прибегают к безреостатному пуску в ход путем изменения, подводимого к двигателю при пуске напряжения.

В ряде отраслей промышленности необходимо иметь возможность регулировать частоту вращения электродвигателей. В этом отношении двигатели постоянного тока обладают весьма ценными свойствами.

Говоря о регулировании частоты вращения, следует различать напряжение сети U_c и напряжение на зажимах двигателя U , которое может отличаться на величину $I_a R_{пр}$, если последовательно с якорем включено регулировочное сопротивление $R_{пр}$. В этом случае

$$U_c = U + I_a R_{пр},$$

или

$$U_c = C_e n \Phi + I_a (R_a + R_{пр}), \quad (6.67)$$

отсюда

$$n = \frac{U_c - I_a (R_a + R_{пр})}{C_e \Phi}. \quad (6.68)$$

Из этой формулы следует, что частоту вращения двигателей постоянного тока можно регулировать тремя способами: изменением напряжения сети U_c ; реостатом в цепи якоря $I_a (R_a + R_{пр})$ и потоком возбуждения Φ .

Рассмотрим регулирование частоты вращения двигателя параллельного возбуждения реостатом в цепи якоря. Предположим, что $U_c = \text{const}$, $i_a = \text{const}$ и статический момент двигателя $M_2 + M_0 = M_{ст}$ задан и не зависит от n , т.е. $M_2 + M_0 = \text{const}$. Определим, как при введении регулировочного реостата изменится режим работы двигателя.

Для этого воспользуемся уравнением равновесия ЭДС и моментов:

$$U_c = C_e n \Phi + i_a (R_a + R_{пр}) + L_a (di_a/dt);$$

$$M = M_2 + M_0 + M_f.$$

Рассмотрим начальную стадию процесса (рис. 6.68). За короткий промежуток времени dt , непосредственно следующий за введением сопротивления $R_{пр}$, наблюдается резкое уменьшение значения тока I_a . Скорость, с которой происходит такое уменьшение, зависит от отношения $T = L_a / (R_a + R_{пр})$, называемого постоянной времени цепи якоря и определяемого параметрами этой

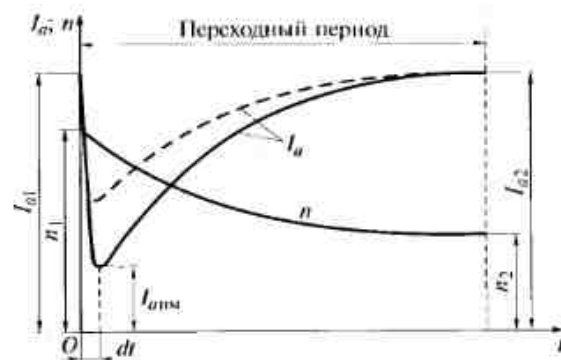


Рис. 6.68. Регулирование частоты вращения двигателя параллельного возбуждения реостатом в цепи якоря

цепи, т.е. ее индуктивностью L_a и сопротивлением $R_a + R_{пр}$. Наименьшее значение $I_{амм}$, до которого уменьшится ток I_{a1} , зависит от механической инерции системы, т.е. инерции двигателя и связанного с ним исполнительного механизма.

Предположим, что инерция системы настолько велика, что ток I_{a1} успеет измениться до значения $I_{амм}$ прежде, чем произойдет сколько-нибудь заметное изменение частоты вращения двигателя n . Тогда ток $I_{амм}$ определится из уравнения ЭДС, в котором $n = \text{const}$ и $di_a/dt = 0$.

Следовательно,

$$I_{амм} = \frac{U_c - C_e n \Phi}{R_a + R_{пр}}$$

При работе до введения реостата

$$I_{a1} = \frac{U_c - C_e n \Phi}{R_a}$$

Таким образом,

$$I_{амм} = \frac{I_{a1} R_a}{R_a + R_{пр}}$$

Такое уменьшение тока якоря влечет за собой уменьшение вращающего момента двигателя $M = C_m \Phi I_a$ пропорционально току I_a . Следовательно, на валу двигателя возникнет отрицательный динамический момент $M_1 = M - (M_2 + M_0)$, под действием которого частота вращения двигателя n начнет уменьшаться. Но снижение частоты вращения вызовет пропорциональное уменьшение обратной ЭДС $E_a = C_e \Phi = C'_e n$ и соответственно увеличение тока I_a пропорционально разности $U_c - C'_e n$. Этот процесс параллельного уменьшения n и E_a и роста тока I_a будет проходить до тех пор, пока ток I_a и, стало быть, вращающий момент не достигнут своих первоначальных значений ($I_{a2} = I_{a1}$ и $M_2 = M_1$). Поскольку при этом $M_1 = 0$, то двигатель начнет работать в новом установившемся режиме при $n_2 < n_1$. Из вышесказанного можно сделать следующие выводы:

- подводимая к двигателю из сети мощность $P_1 = U_c I$ остается без изменения;
- полезная мощность $P_2 = M 2\pi(n/60)$ уменьшается пропорционально n , соответственно уменьшается отдача установки ($\eta = P_2/P_1$);
- условия охлаждения двигателя ухудшаются, так как основные потери в меди цепи остаются без изменения, а количество вентилирующего двигатель воздуха уменьшается пропорционально n ;
- условия коммутации несколько улучшаются вследствие уменьшения ЭДС e_p .

Если двигатель обладает относительно малой инерционностью, то весь процесс проходит в том же порядке, но бросок тока I_{a1} после введения сопротивления $R_{пр}$ будет меньше (прерывистая линия на рис. 6.68), так как одновременно с уменьшением тока I_{a1} происходит снижение частоты вращения n .

Процесс регулирования двигателя последовательного возбуждения осложняется тем, что одновременно с изменением тока I_a меняется ток возбуждения. Чтобы выяснить характер процесса, рассмотрим два случая: когда сталь двигателя сильно насыщена и когда она не насыщена.

В первом случае условия регулирования двигателя последовательного возбуждения те же, что и двигателя параллельного возбуждения, так как в предельно насыщенном последовательном двигателе поток Φ можно считать практически не зависящим от тока, т.е. принять, что $\Phi = \text{const}$. Во втором случае $\Phi \equiv I_a$. Для системы с большой механической инерцией, можно записать

$$U_c = C'_e n I_a + I_a (R_a + R_{пр}),$$

отсюда

$$I_a = \frac{U_c}{C'_e n + R_a + R_{пр}}$$

Считая, что в ближайший после введения реостата момент времени скорость n еще не изменилась и, используя обозначения на рис. 6.68, найдем, что

$$I_{амм} = \frac{I_{a1} (C'_e n + R_a)}{C'_e + R_a + R_{пр}}$$

Поскольку $C'_e n$ превышает R_a в 10 и более раз, то в ненасыщенном последовательном двигателе регулировочный бросок тока выражен менее резко, чем в насыщенном двигателе.

Рассмотрим способ регулирования частоты вращения изменением возбуждения.

Двигатель параллельного возбуждения. Пусть $U_c = \text{const}$ и $M_{ct} = \text{const}$. Если увеличим сопротивление $R_{пр}$ регулировочного реостата в цепи возбуждения, то ток I_a и поток Φ уменьшатся. При этом в первый момент времени заметим резкое увеличение тока в якоре I_a .

Значительное увеличение тока I_a при небольшом уменьшении потока Φ приведет к увеличению вращающего момента M и, следовательно, к появлению положительного динамического момента. Частота вращения начнет увеличиваться, а также будет увеличиваться (после первоначального снижения) ЭДС E_a и уменьшаться после первоначального броска ток I_a (рис. 6.69).

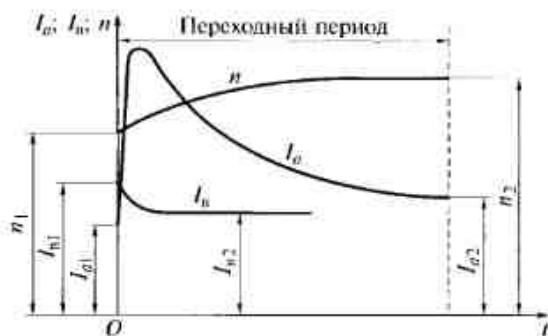


Рис. 6.69. Регулирование частоты вращения двигателя параллельного возбуждения реостатом в цепи обмотки возбуждения

Такой процесс параллельного увеличения значения n и уменьшения значения I_a продолжится до тех пор, пока вращающий момент M двигателя не достигнет своего прежнего значения ($M_2 = M_1$). При этом

$$I_{a2} = I_{a1} \frac{\Phi_1}{\Phi_2},$$

где Φ_1 и Φ_2 — потоки, соответствующие токам возбуждения I_{a1} и I_{a2} .

Если пренебречь разницей между падениями напряжения $I_{a1}R_{a1}$ и $I_{a2}R_{a2}$, то

$$n_2 = n_1 \frac{\Phi_1}{\Phi_2}.$$

В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

КПД остается практически неизменным;

условия охлаждения двигателя не ухудшаются, так как при увеличении частоты вращения растет количество охлаждающего воздуха;

условия коммутации становятся заметно тяжелее как по причине увеличения окружной скорости v_a , так и по причине линейной нагрузки A .

Этот способ позволяет плавно и экономично регулировать n , но если пределы регулирования должны быть широки, то двигатель специально рассчитывают в отношении возбуждения и коммутации. Практически двигатели выполняются с регулированием частоты вращения в пределах 1...1,5, 1...2 и 1...3.

Следующий способ регулирования частоты вращения заключается в изменении питающего напряжения на зажимах якоря. При изменении напряжения от U_1 до U_2 частоты вращения определяются соответственно формулами:

$$n_1 = \frac{U_1 - I_a \sum R_a}{C_e \Phi} = \frac{U_1}{C_e \Phi} - \frac{I_a \sum R_a}{C_e \Phi} = n_{01} - \Delta n_1; \quad (6.69)$$

$$n_2 = \frac{U_2 - I_a \sum R_a}{C_e \Phi} = \frac{U_2}{C_e \Phi} - \frac{I_a \sum R_a}{C_e \Phi} = n_{02} - \Delta n_2. \quad (6.70)$$

В двигателе с параллельным возбуждением частота вращения при холостом ходе изменяется пропорционально напряжению, т.е.

$$\frac{n_{02}}{n_{01}} = \frac{U_2}{U_1},$$

а уменьшение частоты вращения, обусловленное воздействием нагрузки, при $M_{max} = \text{const}$ остается неизменным: $\Delta n_1 = \Delta n_2 = \text{const}$.

В связи с этим скоростные характеристики двигателя с параллельным возбуждением представляют собой семейство параллельных прямых.

Механические характеристики $n = f(M)$ получаются из скоростных путем изменения масштаба оси абсцисс, так как момент пропорционален току якоря. Скоростные и механические характеристики двигателя с последовательным возбуждением строят аналогично.

Регулирование частоты вращения двигателя путем изменения напряжения на зажимах якоря обычно ведут «вниз», т.е. уменьшают напряжение и частоту вращения по сравнению с номинальными.

Основной недостаток способа регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока путем изменения напряжения заключается в том, что для каждого регулируемого двигателя необходим свой автономный источник питания постоянным током, что экономически невыгодно и снижает КПД агрегата.

Двигатель последовательного возбуждения. Существуют два способа регулирования частоты вращения двигателя последовательного возбуждения изменением потока Φ : шунтированием обмотки возбуждения и шунтированием обмотки якоря.

Регулирование частоты вращения шунтированием обмотки возбуждения. Предположим, что $U_c = \text{const}$, $M_{ct} = \text{const}$ и задан ток I_{a1} при работе шунтированного двигателя. Будем считать, что система обладает большой механической инерцией, так что изменение тока заканчивается прежде, чем частота вращения двигателя успеет сколько-нибудь заметно измениться. Если, кроме того, пренебречь падением напряжения, то уравнение ЭДС для ближайшего после шунтирования обмотки возбуждения момента времени имеет следующий вид:

$$U_c = E_a = C_e n \Phi.$$

Из этой формулы следует, что в начальный момент времени регулирования поток Φ , а стало быть, и ток в обмотке возбуждения I_{a1} не изменяются.

Ток в якоре в этот момент составляет $I_a = I_{a1} + I_{ш1}$, т.е. ток I_a увеличивается на величину тока в шунте $I_{ш1}$. Это приводит к повышению вращающего момента $M = C_m \Phi (I_{a1} + I_{ш1})$ и появлению положительного динамического момента $M_d = M - M_{cr}$. Двигатель начнет развивать большую скорость, а параллельно с этим пойдут процессы уменьшения: потока $\Phi = U_c / C_e n$, тока возбуждения I_a , тока в шунте $I_{ш1}$ и тока в якоре $I_a = I_a + I_{a1}$ (рис. 6.70). Этот процесс одновременного увеличения частоты вращения и перераспределения токов в двигателе происходит до тех пор, пока его вращающий момент M не станет равным моменту $M_{cr} = M_2 + M_0$. В результате $n_2 = n_1 (\Phi_1 / \Phi_2)$; ток I_{a1} увеличивается до значения I_{a2} ; ток $I_{ш1}$ уменьшается до значения $I_{ш2}$ так, чтобы $C_m I_{a2} \Phi_2 = C_m I_{a1} \Phi_1 = M$. В остальном оценка способа регулирования частоты вращения двигателя последовательного возбуждения такая же, как для двигателя параллельного возбуждения при регулировании его частоты вращения реостатом $R_{ш}$.

Регулирование частоты вращения двигателя шунтированием якоря. В этом случае, в ближайший после шунтирования момент времени, ток в якоре уменьшится против первоначального, тогда как ток возбуждения остается без изменения ($U_c = C_e n \Phi$); вследствие этого появится отрицательный момент ускорения и двигатель уменьшит частоту вращения.

По окончании процесса значение тока в якоре будет меньше первоначального, а значения тока в обмотке возбуждения и тока из сети увеличатся.

Соответственно этому возрастает потребляемая двигателем мощность P_1 , тогда как его полезная мощность $P_2 = M_2 2\pi (n/60)$ уменьшится.

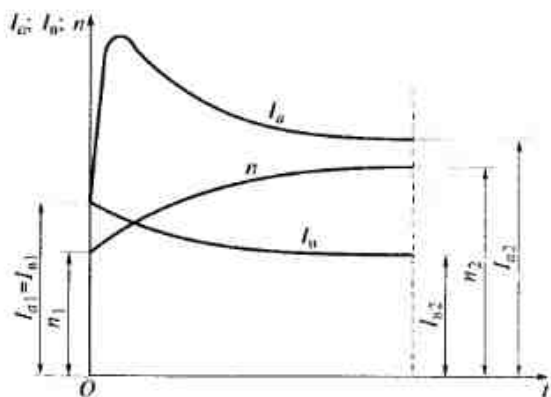
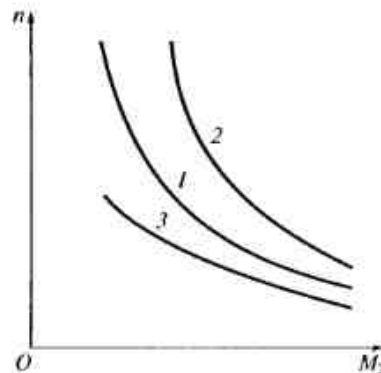


Рис. 6.70. Регулирование частоты вращения двигателя последовательного возбуждения шунтированием обмотки возбуждения

Рис. 6.71. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения при разных способах регулирования частоты вращения:

1 — с нешунтированными обмотками; 2 — с шунтированной обмоткой возбуждения; 3 — с шунтированной обмоткой якоря



Отсюда следует, что данный способ регулирования частоты вращения двигателя последовательного возбуждения неэкономичен.

На рис. 6.71 показаны сравнительные механические характеристики двигателя последовательного возбуждения при разных способах регулирования частоты вращения.

К проблемам регулирования двигателей относится также вопросы их торможения, имеющие для некоторых видов приводов большое значение.

Торможение необходимо для быстрой остановки двигателя при реверсировании, в аварийных случаях и т.д. Возможны следующие способы торможения: генераторное торможение с рекуперацией, т.е. возвратом энергии в сеть; способом противовключения и динамическое торможение.

Двигатель параллельного возбуждения. Генераторное торможение. На рис. 6.72 показаны механические характеристики для трех режимов.

Будем считать, что $U_c = \text{const}$, $I_a = \text{const}$, следовательно, $\Phi = \text{const}$ и из уравнения (6.67) имеем

$$I_a = \frac{U_c - E_a}{R_a + R_{гр}} = \frac{U_c - C_e n \Phi}{R_a + R_{гр}}$$

Чтобы перевести двигатель в генераторный режим торможения, нужно начать ускорять двигатель, т.е. увеличивать n при помощи исполнительного механизма. Ток I_a и момент M начнут уменьшаться.

При некоторой частоте вращения $n = n_0$ получим $C_e n_0 \Phi = U_c$, $I_a = 0$ и $M = 0$, независимо от значения сопротивления $R_a + R_{гр}$. Следовательно, при $M = 0$ все механические характеристики двигателя параллельного возбуждения проходят через общую точку A на оси ординат. При дальнейшем увеличении частоты вращения ($n > n_0$) ток I_a и момент M изменят знак и машина начнет

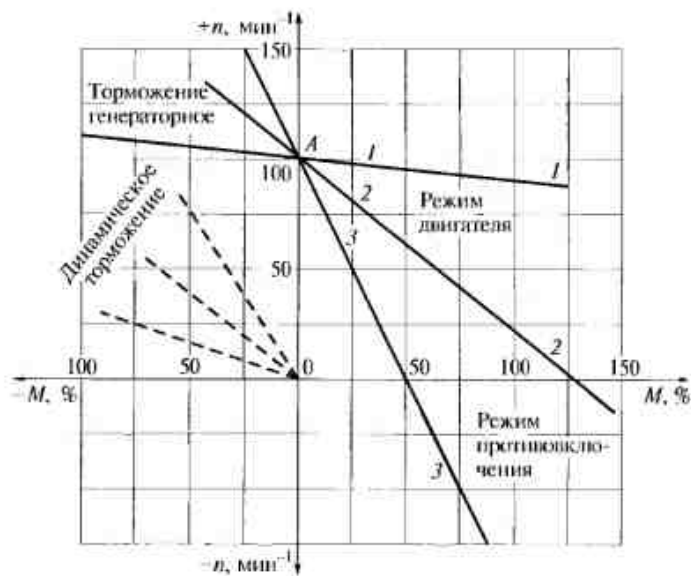


Рис. 6.72. Механические характеристики торможения двигателя параллельного возбуждения:

1 — естественная; 2 — при регулировочном сопротивлении R_{p1} ; 3 — при регулировочном сопротивлении R_{p2} .

работать в режиме генератора, отдавая энергию в сеть, с характеристикой $n = f(-M)$, являющейся продолжением характеристик $n = f(+M)$. Эта операция обратна операции перевода генератора в режим двигателя.

Торможение противозащелкиванием. В этом случае якорь двигателя должен вращаться в сторону, обратную той, куда направлен электромагнитный момент двигателя M . Предположим, что двигатель поднимает некоторый груз, развивая момент M и вращаясь с частотой n .

Если последовательно увеличивать груз, то ток I_a и момент M будут расти, а частота вращения n будет уменьшаться. При определенной массе груза двигатель может остановиться ($n = 0$), а при дальнейшем увеличении массы груза начнет вращаться в обратную сторону ($-n$), т.е. против создаваемого им момента M .

В этом случае ЭДС изменит свой знак, т.е. начнет действовать согласно с напряжением сети U_c , соответственно чему $I_a = (U_c + E_a)/R_a$.

Такой режим возможен лишь при неизменном условии введения в цепь якоря достаточного сопротивления R_{p1} , так в противном случае ток I_a превысит допустимые пределы.

Таким образом,

$$I_a = \frac{U_c + E_a}{R_a + R_{p1}}$$

Умножив обе части этого уравнения на I_a , получим

$$I_a^2(R_a + R_{p1}) = U_c I_a + E_a I_a,$$

где $U_c I_a$ — мощность, подводимая из сети; $E_a I_a$ — мощность, подводимая с вала двигателя.

Поскольку сопротивление R_a невелико по сравнению с R_{p1} , то мощность $U_c I_a + E_a I_a$ тратится главным образом на нагрев реостата.

На рис. 6.72 показаны механические характеристики в режиме противозащелкивания $n = f(M)$, представляющие собой продолжение механических характеристик 2 и 3 вниз от оси абсцисс.

Динамическое торможение. Динамическое торможение состоит в том, что якорь двигателя параллельного возбуждения отключается от сети и замыкается на реостат, обмотка возбуждения остается под напряжением сети.

Машина работает некоторое время генератором на реостат, постепенно затормаживаясь по мере расходования запасенной ранее кинетической энергии. Если принять, что $I_a = \text{const}$ и пренебречь реакцией якоря, то

$$M = C'_a I_a = C'_a (E_a / \sum R_a) = C''_a (n / \sum R_a),$$

где $\sum R_a$ — сопротивление цепи якоря.

Таким образом, механические характеристики динамического торможения двигателя параллельного возбуждения представляют собой прямые линии, проходящие через начало координат тем круче, чем больше сопротивление $\sum R_a$ (пунктирные линии на рис. 6.72).

Торможение двигателя последовательного возбуждения. *Генераторное торможение.* Оно возможно лишь в случае, если двигатель перевести на параллельное или независимое возбуждение. Такие схемы широко применяются в тяговых установках с рекуперацией, т.е. возвратом энергии в сеть.

Если же, сохраняя последовательное возбуждение, увеличивать частоту вращения двигателя в направлении его электромагнитного момента, то не произойдет торможения, так как при увеличении частоты вращения уменьшается ток I_a , а стало быть и поток Φ .

В пределе при $n = \infty$ и $\Phi = 0$ (остаточным магнетизмом пренебрегаем) ЭДС E_a может как угодно близко подойти к напряжению U_c , но не сможет превзойти его.

В этом состоит существенная разница между двигателями параллельного и последовательного возбуждения.

Динамическое торможение. Для последовательного двигателя динамическое торможение, т.е. его перевод на работу последова-

тельным генератором, замкнутым на некоторое сопротивление R , возможно лишь при самовозбуждении генератора. Однако при малых частотах вращения или слишком больших сопротивлениях R машина не самовозбуждается и, следовательно, не создает тормозящего момента. По достижении определенной частоты вращения самовозбуждение последовательного генератора протекает очень быстро и торможение приобретает характер толчка, что часто недопустимо.

При противовключении следует привести последовательный двигатель во вращение в сторону, обратную той, куда направлен его электромагнитный момент, включив для ограничения тока некоторое сопротивление в цепь якоря.

В этом случае, так же как и для двигателя параллельного возбуждения, получается плавный переход из двигательного режима в режим противовключения.

6.11. Переходные процессы в машинах постоянного тока

При включениях, отключениях, резких переходах из одного режима работы в другой, коротких замыканиях в отдельных цепях машин постоянного тока возникают кратковременные электромагнитные переходные процессы, которые в ряде случаев связаны и с переходными электромеханическими и тепловыми процессами.

Без анализа этих процессов нельзя правильно сконструировать машину и обеспечить безотказность ее работы.

Рассмотрим переходные процессы, наиболее характерные для машин, работающих в режимах генератора и двигателя.

Процессы возбуждения и самовозбуждения генераторов. В машинах постоянного тока обычно приходится определять скорость возбуждения машины, т. е. скорость нарастания магнитного потока и ЭДС в якоре.

Точное аналитическое решение этой задачи очень сложное, так как приходится учитывать нелинейные характеристики магнитной системы машины и возникновение вихревых токов в ее массивных частях.

Однако, принимая во внимание сравнительно медленное протекание процессов возбуждения, можно в первом приближении пренебречь влиянием вихревых токов, учитывая их сравнительно быстрое затухание, или учесть их влияние за счет некоторого снижения индуктивностей цепи возбуждения.

Рассмотрим процесс нарастания магнитного потока машины при соединении обмотки возбуждения с независимым источником постоянного тока с напряжением U_2 .

В этом случае

$$U_2 = w_2(d\Phi/dt) + I_a R_a, \quad (6.71)$$

где Φ — магнитный поток, сцепленный с обмоткой возбуждения.

Обозначим конечные значения тока возбуждения и магнитного потока соответственно через I_a и $\Phi_{ном}$; тогда, полагая $\Phi/\Phi_{ном} = \varphi$; $T = w_2\Phi_{ном}/U_2$; $t/T = \tau$; $U_2 = I_{a,ном}R_a$ и, выразив I_a в относительных единицах (в долях тока $I_{a,ном}$), из формулы (6.71) получим

$$d\varphi/d\tau + i_a - 1 = 0. \quad (6.72)$$

С достаточной точностью для рассматриваемой задачи нелинейность магнитной характеристики можно учесть с помощью уравнения гиперболы

$$i_a = \varphi/(a - b\varphi), \quad (6.73)$$

поскольку при $\varphi = 1$ ток $I = I_a$, то всегда $a - b = 1$.

Если по магнитной характеристике известно, что при φ_1 ток имеет значение i_{a1} , то из (6.73) найдем:

$$a = \frac{\varphi_1(1 - i_{a1})}{i_{a1}(1 - \varphi_1)} \quad \text{и} \quad b = \frac{\varphi_1 - i_{a1}}{i_{a1}(1 - \varphi_1)}.$$

После подстановки уравнения (6.73) в (6.72) исходное уравнение примет следующий вид:

$$\frac{d\varphi}{d\tau} + \frac{\varphi}{a - b\varphi} - 1 = 0, \quad (6.74)$$

отсюда

$$\tau = \int_0^{\varphi} \frac{d\varphi}{1 - \frac{\varphi}{a - b\varphi}}.$$

После интегрирования получим

$$\tau = \frac{b}{a} \varphi - \frac{1}{a} \ln(1 - \varphi). \quad (6.75)$$

На рис. 6.73 показаны характеристики процесса возбуждения для случая $a = 3$ и $b = 2$.

Магнитный поток достигает относительного значения $\varphi = 0,95$, близкого к установившемуся, при

$$\tau = \frac{2}{3} \cdot 0,95 - \frac{1}{3} \ln(1 - 0,95) = 1,633.$$

Если учесть, что постоянная времени обмотки T может составлять 2...4 с, то полученному значению τ будет соответствовать

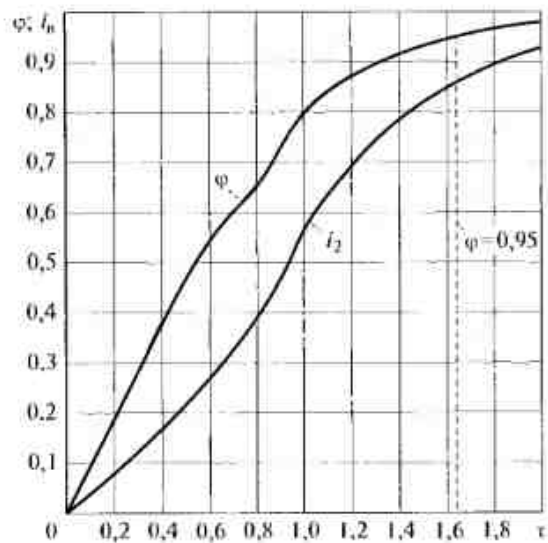


Рис. 6.73. Процесс нарастания тока возбуждения и магнитного потока при включении обмотки возбуждения

время нарастания магнитного потока $1,633(2...4) \approx 3...7$ с. В некоторых случаях это время получается еще большим.

Рассмотрим процесс самовозбуждения. Будем считать, что якорь генератора параллельного возбуждения вращается с постоянной частотой вращения n при разомкнутой обмотке возбуждения. Небольшое напряжение E_{10} на зажимах генератора будет обусловлено только остаточным полем. Если замкнуть обмотку возбуждения, то под действием остаточного напряжения в ней потечет небольшой ток.

Если включение обмотки таково, что начальный ток ослабит остаточное поле, то машина через малый промежуток времени полностью развозбудится и остаточное поле исчезнет. При правильном включении обмотки начальный ток усилит остаточное поле, ЭДС якоря и ток возбуждения будут возрастать до тех пор, пока избыточное напряжение

$$\Delta E_1 = E_1 - i_n R_n$$

усиливающее ток, не станет равным нулю. Такое состояние возникнет, очевидно, при $E_{1ном} - I_{н,ном} R_n = 0$.

Таким образом, для правильного протекания процесса самовозбуждения необходимы, во-первых, наличие остаточного поля ($E_{12} \neq 0$) и, во-вторых, взаимное пересечение магнитной характеристики $E_1 = f_1(i_n)$ с характеристикой цепи возбуждения $i_n R_n = f_n(i_n)$.

Рассмотрим протекание процесса самовозбуждения во времени. Разность между ЭДС E_1 якоря и падением напряжения $i_n R_n$ должна быть уравновешена ЭДС, наводимой в обмотке возбуждения, сцепленной с ней нарастающим магнитным потоком Φ :

$$E_1 - i_n R_n = w_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.76)$$

Запишем это выражение в безразмерном виде. Для этого положим $E_1/E_{1ном} = e_1$; тогда получим

$$\frac{w_2}{E_{1ном}} \frac{d\Phi}{dt} = \frac{w_2 \Phi_{ном}}{E_{1ном}} \frac{d\frac{\Phi}{\Phi_{ном}}}{dt} = T \frac{d\frac{E_1}{E_{1ном}}}{dt} = \frac{de_1}{d\tau}$$

где $T = \frac{w_2 \Phi_{ном}}{E_{1ном}}$ — постоянная времени обмотки возбуждения; $\tau = \frac{t}{T}$.

Кроме того, согласно уравнению (6.73) примем, что

$$i_n = \frac{e_1}{a - be_1} \quad (6.77)$$

При этих условиях равенство (6.76) примет следующий вид:

$$e_1 - \frac{e_1}{a - be_1} = \frac{de_1}{dt} \quad (6.78)$$

отсюда

$$\tau = \int_{e_0}^{e_1} \frac{de_1}{\frac{e_1}{a - be_1} - e_1} \quad (6.79)$$

Магнитная характеристика проходит через начало координат, поэтому для учета остаточной ЭДС $e_0 = E_{10}/E_{1ном}$ уравнение (6.79) можно интегрировать не от значения $e_1 = 0$, а от значения $e_1 = e_0$. Такой способ учета остаточной ЭДС заметных ошибок не дает. После интегрирования получим

$$\tau = \frac{1}{b} \ln \frac{1 - e_0}{(1 - e_1) \left(\frac{e_1}{e_0} \right)^a} \quad (6.80)$$

Эта зависимость показывает, что процесс самовозбуждения машины протекает в несколько раз медленнее процесса возбуждения ее от независимого источника.

Переходные процессы при коротком замыкании генератора с параллельным возбуждением. Для упрощения анализа переходного

процесса, возникающего при коротком замыкании на зажимах генератора, примем ряд допущений. Будем считать, что щетки установлены на геометрической нейтральной, следовательно, поперечное магнитное поле якоря мало влияет на продольное поле и это влияние учитывать не будем.

Пренебрежем также влиянием коммутационных токов на продольное поле машины.

Магнитную характеристику машины в первом приближении будем считать прямолинейной, а частоту вращения якоря — постоянной.

При коротком замыкании генератора образуются два замкнутых контура: нагрузки (сопротивление внешней цепи примем равным нулю) и возбуждения. Для этих контуров можно записать следующие уравнения:

$$-L_1 \frac{di_1}{dt} - i_1 R_1 - i_n R = 0; \quad (6.81)$$

$$L_2 \frac{di_n}{dt} - i_n R_n = 0, \quad (6.82)$$

где L_1 — индуктивность цепи якоря; L_2 — индуктивность обмотки возбуждения; i_1 — ток в якоре; i_n — ток в обмотке возбуждения; R — коэффициент пропорциональности между ЭДС E_1 якоря и током возбуждения i_n ; этот коэффициент в дальнейшем будем считать постоянным; R_1 — сопротивление цепи якоря, включая переходные сопротивления щеточных контактов; R_n — сопротивление цепи обмотки возбуждения.

Из уравнения (6.82) имеем

$$dt = -\frac{L_2}{R_n} \frac{di_n}{i_n},$$

откуда

$$t = \frac{L_2}{R_n} \int_{i_{n0}}^{i_n} \frac{di_n}{i_n} = -\frac{L_2}{R_n} (\ln i_n - \ln i_{n0}) = -\frac{L_2}{R_n} \ln \frac{i_n}{i_{n0}}. \quad (6.83)$$

Постоянная цепи возбуждения $T_2 = L_2/R_n$, поэтому

$$i_n = i_{n0} e^{-t/T_2}. \quad (6.84)$$

Подставив найденное значение тока возбуждения в (6.81), получим

$$-L_1 \frac{di_1}{dt} - i_1 R_1 + i_{n0} R e^{-t/T_2} = 0. \quad (6.85)$$

Введем обозначения: $L_1/R_1 = T_1$ — постоянная времени цепи якоря; $p = R/R_1$ — безразмерный коэффициент.

С учетом этого уравнение (6.85) можно записать в следующем виде:

$$-T_1 \frac{di_1}{dt} - i_1 + p i_{n0} e^{-t/T_2} = 0. \quad (6.86)$$

Проинтегрировав уравнение (6.86), получим

$$i_1 = A e^{-t/T_1} + B e^{-t/T_2}, \quad (6.87)$$

следовательно,

$$\frac{di_1}{dt} = -\frac{A}{T_1} e^{-t/T_1} - \frac{B}{T_2} e^{-t/T_2}. \quad (6.88)$$

После подстановки уравнений (6.87) и (6.88) в (6.86) получим

$$-A \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) e^{-t/T_1} + p i_{n0} e^{-t/T_2} = 0,$$

отсюда находим

$$A = \frac{i_{n0} p}{1 - \frac{T_1}{T_2}}. \quad (6.89)$$

При $t = 0$ ток $i_{n0} = i_1 = A + B$, поэтому

$$B = i_{n0} - A = i_{n0} \left(1 - \frac{p}{1 - \frac{T_1}{T_2}}\right). \quad (6.90)$$

Подставив найденные значения постоянных интегрирования A и B в уравнение (6.87) и полагая $T_1/T_2 = \tau$, получим

$$i_1 = i_{n0} \left(\frac{p}{1 - \tau}\right) e^{-t/T_1} + \left(1 - \frac{p}{1 - \tau}\right) e^{-t/T_2}. \quad (6.91)$$

Обычно $\tau \leq 1$ и $p \geq 1$, поэтому выражение (6.91) можно заменить приближенным равенством

$$i_1 = i_{n0} \frac{p}{1 - \tau} (e^{-t/T_2} - e^{-t/T_1}). \quad (6.92)$$

Ток короткого замыкания достигает максимального значения при $di_1/dt = 0$, т. е. когда согласно (6.92)

$$-\frac{1}{T_2} e^{-t/T_2} + \frac{1}{T_1} e^{-t/T_1} = 0,$$

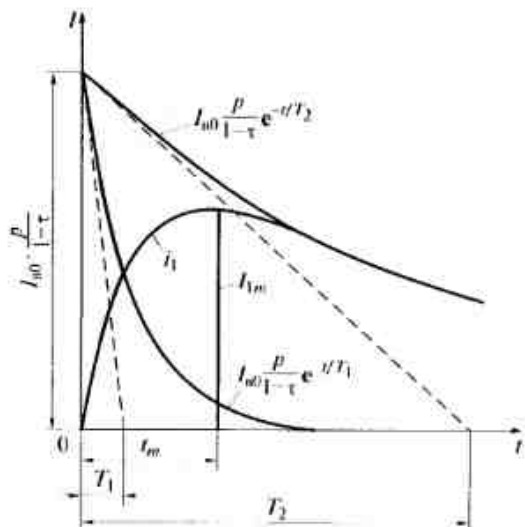


Рис. 6.74. Процесс короткого замыкания генератора с параллельным возбуждением

поэтому время, в течение которого ток I_1 достигает максимального значения, равно

$$t_m = \frac{\ln \frac{1}{1 - \tau}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad (6.93)$$

Это время сравнительно, невелико и измеряется десятными долями секунды.

На рис. 6.74 приведены кривые, показывающие изменение токов в обмотках возбуждения и якоря генератора с параллельным возбуждением в процессе короткого замыкания при условии, что частота вращения якоря в течение всего процесса остается постоянной.

В действительности такое допущение возможно только для начальной стадии процесса в пределах от $t = 0$ до $t = t_m$.

При $t > t_m$ частота вращения обычно начинает заметно снижаться вследствие большого противодействующего момента генератора, что приводит к более быстрому уменьшению тока короткого замыкания.

Высокая кратность тока короткого замыкания требует применения при эксплуатации генераторов постоянного тока большой мощности специальных быстродействующих автоматов, позволяющих отключать генератор от сети за время, значительно меньшее t_m .

Переходные процессы при пуске в ход двигателя постоянного тока. При пуске в ход двигателя постоянного тока возникают электромагнитные и электромеханические переходные процессы, влияющие на скорость пуска и процесс разбега двигателя.

Процесс разбега определяется уравнением моментов сил, действующих на вал двигателя, при пуске:

$$M + J \frac{d\omega}{dt} + M_c + M_0 = 0, \quad (6.94)$$

где M — момент вращения, развиваемый двигателем; J — момент инерции вращающихся масс; M_c — момент сопротивления на валу, обусловленный вращаемым механизмом; M_0 — момент сопротивления, обусловленный механическими и частично добавочными потерями двигателя.

Решение уравнения (6.94) аналитически в общем случае представляет значительные трудности.

При решении приходится находить зависимости $M = \varphi_1(\omega)$ и по ним с учетом (6.94) определять $\omega = \psi(t)$, где t — время в процессе разбега.

При решении (6.94) сделаем ряд упрощающих допущений: процесс разгона двигателя протекает достаточно медленно и электромагнитными кратковременными переходными процессами, связанными с изменением тока в отдельных цепях, можно пренебречь;

рассматривать момент M в первом приближении как статический момент вращения двигателя.

Обозначим избыточный момент вращения на валу двигателя через

$$M_2 = M + M_c + M_0 = \psi(\omega);$$

будем считать, что функция $\psi(\omega)$ задана. В этом случае уравнение (6.94) примет следующий вид:

$$M_2 + J \frac{d\omega}{dt} = 0. \quad (6.95)$$

Это уравнение может быть решено графически или аналитически в тех случаях, когда известно аналитическое выражение функции $M_2 = \psi(\omega)$.

Из уравнения (6.95) следует, что

$$t = -J \int_0^{\omega} \frac{d\omega}{M_2}. \quad (6.96)$$

На рис. 6.75 показан графический метод решения уравнения (6.95). В левом квадранте изображены функции $M = \psi_1(\omega)$ (кривая 1), $-(M_c + M_0) = \psi_2(\omega)$ (кривая 2), их разность $M_2 = \psi_3(\omega)$ и обратная функция $1/M_2 = \psi_4(\omega)$ (кривая 3).

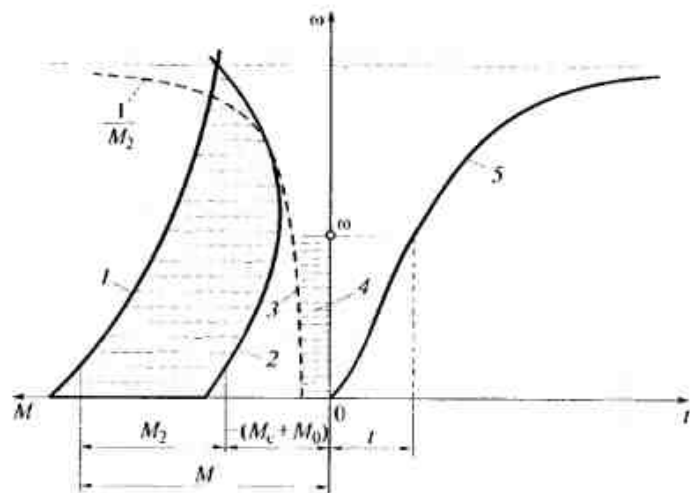


Рис. 6.75. Графический анализ процесса разбега двигателя:

1 — $M = \psi(\omega)$; 2 — $-(M_c + M_0) = \psi_1(\omega)$; 3 — $1/M_2 = \psi_2(\omega)$; 4 — заштрихованная площадь кривой $\psi_1(\omega)$; 5 — $\omega = \psi_3(t)$

Из уравнения (6.96) следует, что время t , необходимое якорю двигателя для перехода от состояния покоя до вращения с угловой частотой ω , пропорционально заштрихованной площади 4 кривой $\psi_1(\omega)$.

Найденная зависимость $\omega = \psi_3(t)$ показана в виде кривой 5 в правом квадранте.

Как правило, при пуске в ход двигателей постоянного тока используют многоступенчатые пусковые сопротивления.

При этом процессе разгона двигателя следует разбить на отдельные интервалы, соответствующие отдельным ступеням сопротивления.

6.12. Испытания машин постоянного тока

При изготовлении, перед эксплуатацией или после ремонта машины постоянного тока в соответствии со стандартом должны проходить испытания или полные, так называемые приемочные или сокращенные — приемосдаточные.

Стандарт предписывает следующую программу приемочных испытаний:

измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками и сопротивления обмоток при постоянном токе в практически холодном состоянии;

испытание машины при повышенной частоте вращения, изоляции обмоток на электрическую прочность относительно корпуса машины и между обмотками и электрическую прочность межвитковой изоляции обмоток;

определение тока возбуждения генератора или частоты вращения двигателя при холостом ходе (для двигателей с последовательным возбуждением — при независимом возбуждении) и характеристики холостого хода, проверка коммутации при номинальной нагрузке и кратковременной перегрузке по току (для машин мощностью свыше 500 кВт допускается проводить это испытание в режиме короткого замыкания);

определение внешней характеристики генератора или механической (скоростной) характеристики двигателя и регулировочной характеристики генератора или двигателя;

испытание машины на нагревание; определение области безыскровой работы (для машин с добавочными полюсами) и КПД; измерение вибрации, биения коллектора, уровня радиопомех и шума.

В программу приемосдаточных испытаний машин постоянного тока входят первые семь из перечисленных операций программы приемочных испытаний, в отдельных случаях проводят измерение вибрации и уровня шума.

До начала испытаний машин постоянного тока следует проверить правильность соединений обмоток машины и состояние коллектора.

В табл. 6.3 приведены обозначения обмоток машин постоянного тока, предписываемые стандартом.

Проверка правильности соединения обмоток в собранной и подготовленной к испытанию машине заключается в том, чтобы

Таблица 6.3

Наименование обмотки	Обозначение выводов	
	Начало	Конец
Обмотка якоря	Я1	Я2
Обмотка добавочных полюсов	Д1	Д2
Компенсационная обмотка	1	2
Последовательная обмотка возбуждения	С1	С2
Параллельная обмотка возбуждения	Ш1	Ш2
Обмотка независимого возбуждения	Н1	Н2
Уравнительная обмотка и уравнительный провод	У1	У2
Обмотка особого назначения	О1; О3	О2; О4

Таблица 6.4

Тип обмотки	Полярность щеток			
	при вращении машины по часовой стрелке		при вращении машины против часовой стрелки	
	Главный полюс			
	N	S	N	S
Петлевая прямоходовая		-	-	+
Петлевая обратногоходовая	-		+	-
Волновая прямоходовая	-		+	-
Волновая обратногоходовая	+	-	-	+

определить, правильно ли обозначены начала и концы всех обмоток и правильно ли соединены эти обмотки между собой.

В принципе, понятия «начало» и «конец» обмоток условны, поэтому следует оговорить, что следует считать началом обмотки. Для этого установлено следующее правило. Если смотреть на машину со стороны приводного конца вала (а в машинах с двумя приводными концами вала — со стороны, противоположной коллектору), то при работе машины в режиме двигателя и вращении ее по часовой стрелке ток во всех обмотках должен протекать от начала к концу.

Началом обмотки якоря считается та часть обмотки, которая соединена со щетками той полярности, к которой присоединен положительный провод сети (это правило справедливо для генератора и двигателя).

Щетки на коллекторе обычно располагают примерно напротив середины главных полюсов. Полярность щеток можно определить по отношению к полярности главных полюсов, пользуясь табл. 6.4

Полярность добавочных полюсов должна соответствовать следующему правилу: по направлению вращения двигателя после каждого главного полюса следует добавочный полюс той же полярности, а в генераторах — добавочный полюс противоположной полярности.

Правильность соединения обмоток можно проверить и таким способом: при сохранении направления вращения машины при переходе от режима работы двигателя к генератору или обратно ток в якоре в обмотках последовательной цепи должен изменить направление, а в обмотках параллельного или независимого возбуждения — сохранить направление; при изменении направления вращения и сохранении режима работы машины (генератор или двигатель) ток должен изменить направление или в последова-

тельной цепи, или в обмотках параллельного либо независимого возбуждения.

Пользуясь перечисленными правилами, процедура проверки правильности маркировки выводов обмоток и их соединений может быть следующей.

Первоначально любая щетка может быть условно принята положительной.

Обычно петлевую обмотку выполняют прямоходовой, а волновую — обратногоходовой. В соответствии с табл. 6.4 напротив щеток положительной полярности должны находиться южные главные полюса.

Тогда при параллельной обмотке возбуждения может быть отмечен один из выводов этой обмотки, к которому должен быть присоединен положительный проводник питания, для создания необходимой полярности главных полюсов.

Такую же полярность полюсов должна создавать последовательная обмотка возбуждения, что позволяет разметить ее начало и конец.

Далее, учитывая, что в генераторе, если двигаться в направлении вращения, после главного полюса определенной полярности должен следовать добавочный полюс противоположной полярности, можно произвести маркировку начала и конца добавочного полюса.

Проверка состояния поверхности коллектора до начала испытаний машины и затем, если это требуется, в процессе испытаний является очень важной и ответственной операцией. Основные требования к поверхности коллектора:

поверхность должна иметь правильную цилиндрическую форму; образующие цилиндра — строго прямолинейны;

коллектор не должен создавать биения щеток вследствие эксцентрисичности поверхности коллектора, которая может возникнуть из-за неправильной центровки при обточке коллектора, выступания или провала отдельных коллекторных пластин;

изоляция между пластинами не должна выступать за рабочую поверхность коллектора;

промежутки между пластинами должны быть свободны от стружек, всевозможных кусочков, пыли и т.п.;

пластины не должны иметь острых краев, заусенцев и т.п.

Шероховатость поверхности коллектора после приработки ее со щетками должна быть не ниже класса 7.

Перед испытаниями машины постоянного тока кроме проверки состояния обмоток и коллектора обычно проверяют качество сборки машины, равномерность воздушного зазора между главными и добавочными полюсами и якорем, равномерность расстановки полюсов по окружности магнитной системы и щеток по окружности коллектора, силу нажатия на щетки, расстояние ниж-

ней кромки щеткодержателей от рабочей поверхности коллектора, аксиальную симметрию сердечников якоря и полюсов.

Значение воздушного зазора обычно измеряют с помощью щупов под серединой каждого полюса, при этом, если длина сердечника якоря превышает 300 мм, рекомендуется проводить измерение с обеих торцов машины.

Если измерение воздушного зазора затруднено вследствие конструктивных особенностей машины, например наличия стеклобандажа на якоре, то допускается определение воздушного зазора по разности диаметров полюсной системы и якоря. Если машина выполнена с эксцентричным зазором, измеряют обычно лишь минимальный зазор.

Представляет интерес проверка формы наружной поверхности якоря и магнитной системы.

Для проверки формы наружной поверхности якоря измеряют зазор под одним и тем же полюсом при повороте якоря на равные доли оборота. Форму внутренней поверхности магнитной системы определяют, измеряя воздушный зазор в одной и той же точке якоря, поворачивая якорь каждый раз на одно полюсное деление.

Если такой поворот якоря трудно осуществить, можно измерять воздушный зазор под всеми полюсами при двух диаметрально противоположных положениях якоря относительно магнитной системы.

Перед началом испытаний проверяют также установку щеток в нейтральное положение, т.е. такое положение щеток, при котором напряжение на них при отсутствии нагрузки на якоре имеет максимально возможное значение. Установить щетки в нейтральное положение можно двумя методами: индуктивным при неподвижном якоре или методом реверсирования при работе машины под нагрузкой.

Индуктивный метод основан на том, что при нахождении щеток на нейтрали ЭДС, наводимая в обмотке неподвижного якоря, должна быть равна нулю. Поэтому если при неподвижном якоре щетки разной полярности соединить с чувствительным магнитоэлектрическим прибором (предпочтительно с нулем по середине шкалы), а обмотку главных полюсов кратковременно подключать к источнику постоянного тока, то при положении щеток, соответствующем нейтрали, стрелка прибора не должна отклоняться или отклонения должны быть минимальными и направленными в разные стороны.

Для нахождения нейтрального положения щетки предварительно устанавливают напротив середины главных полюсов, а затем, регулируя их положение и наблюдая за отклонениями стрелки упомянутого прибора, исключают отклонения стрелки или допускают минимальные при отключении обмотки главных полюсов от источника.

Опыт повторяют при установке якоря в различные положения по отношению к полюсам. При отсутствии источника постоянного тока обмотку главных полюсов можно подключать к источнику переменного тока. При положении щеток, соответствующем нейтрали, чувствительный вольтметр переменного тока, присоединенный к щеткам разной полярности, покажет минимальное напряжение.

Метод реверсирования заключается в том, что при работе машины под нагрузкой положение щеток, соответствующее нейтрали, определяют, изменяя направление вращения машины.

Для двигателей постоянного тока при неизменных напряжении, токе нагрузки и токе возбуждения передвигают щетки таким образом, чтобы добиться практически неизменной частоты вращения при реверсе; это положение щеток будет соответствовать нейтральному.

Опыт лучше всего проводить при номинальной частоте вращения.

Для генераторов постоянного тока неизменными поддерживают частоту вращения, токи нагрузки и ток возбуждения; при положении щеток, соответствующем нейтрали, практически не изменяется напряжение на зажимах генератора при реверсировании. При этом питание обмотки возбуждения должно быть независимым.

У машин со смешанным возбуждением, как известно, обмотки возбуждения могут создавать согласные или встречные магнитные потоки.

При поиске нейтрального положения щеток в машинах со смешанным возбуждением методом реверсирования, естественно, следует сохранять систему возбуждения, т.е. согласное или встречное направление магнитных потоков обмоток возбуждения; допускается отключать при этом испытании последовательную обмотку.

Окончательно щетки в нейтральное положение должны быть установлены после приработки щеток к контактной поверхности коллектора.

Особенности измерения сопротивления обмотки якоря. Обычно любые обмотки электрических машин, кроме обмотки якоря машин постоянного тока, имеют начало и конец, поэтому измерение их сопротивлений при постоянном токе не вызывает особых трудностей.

Особенность обмотки якоря машины постоянного тока заключается в том, что она не имеет ни начала, ни конца; за них можно принять любые две точки, присоединенные к коллектору. Измерение сопротивления обмотки якоря возможно только через коллекторные пластины.

При этом необходимо знать тип и схему обмотки якоря, наличие и число уравнительных соединений, так как результаты изме-

рений следует пересчитывать, если по результатам измерений придется определять расчетное сопротивление, необходимое для расчета потерь в обмотке и определения КПД.

В случае если измерение сопротивления производится для определения превышения температуры обмотки якоря при испытании на нагрев, то знать тип и схему обмотки необязательно, поскольку производится относительное сравнение измеренных сопротивлений в процессе нагрева машины.

Измерения осуществляют между произвольными коллекторными пластинами, удаленными друг от друга не менее чем на $K/(2p)$ и выбранными так, чтобы измеряемое сопротивление было наибольшим.

При простых волновых или простых петлевых обмотках с полным числом уравнительных соединений измерения сопротивлений следует проводить между коллекторными пластинами, отстоящими одна от другой на $K/(2p)$ пластин.

Если отношение $K/(2p)$ оказывается дробным числом, то его округляют до ближайшего целого.

Лучше всего измерять сопротивление обмотки якоря при поднятых или изолированных щетках, если это легко осуществить. В остальных случаях допускается измерение сопротивления обмотки якоря при опущенных щетках. При этом измерительные приборы следует подключать к коллекторным пластинам, находящимся вблизи оси щеток.

Очень удобно применять для измерения сопротивления обмотки якоря двойные игольчатые щупы — по одной паре щупов подводится измерительный ток, а другая пара щупов используется для измерения падения напряжения.

Характеристика холостого хода. При холостом ходе определяются ток возбуждения генератора или частота вращения двигателя.

Характеристика холостого хода генератора — зависимость напряжения на выходе генератора в функции тока возбуждения $U_0 = f(I_a)$.

Характеристику холостого хода определяют при независимом возбуждении или при самовозбуждении.

Если машина имеет смешанное возбуждение, то при снятии характеристики холостого хода обмотка последовательного возбуждения не должна быть нагружена током обмотки параллельного возбуждения.

Для машины с последовательным возбуждением характеристику холостого хода снимают при независимом питании обмотки возбуждения.

При снятии характеристики холостого хода испытываемую машину приводят во вращение двигателем любого вида с постоянной частотой вращения.

Если при испытании не удастся поддерживать частоту вращения постоянной, то одновременно с измерением напряжения и тока следует измерять частоту вращения в момент измерения U , а затем приводить измеренное напряжение U к номинальному $U_{ном}$ пересчетом по следующей формуле

$$U_{ном} = U n_{ном} / n. \quad (6.97)$$

Характеристику холостого хода снимают одним из следующих методов.

Первый метод заключается в том, что ток возбуждения плавно снижают, начиная с наибольшего значения, до нуля. Вследствие влияния остаточного намагничивания полюсов при токе возбуждения, равном нулю, напряжение холостого хода U_0 не будет равно нулю. Для получения характеристики холостого хода, проходящей через начало координат, снятую характеристику необходимо сместить по оси абсцисс на значение, полученное путем экстраполяции характеристики до пересечения с осью абсцисс.

При другом методе ток возбуждения, начиная с наибольшего значения, плавно и только в одном направлении уменьшают до нуля, затем изменяют полярность обмотки возбуждения на обратную, вновь плавно увеличивают ток возбуждения до максимально возможного значения и снова уменьшают его до нуля. Изменив полярность обмотки возбуждения на первоначальную, доводят ток возбуждения до исходного значения.

В этом случае за характеристику холостого хода принимают среднюю линию (см. рис. 6.51).

Ток возбуждения генератора определяют в режиме холостого хода при номинальном напряжении на якоре и номинальной частоте вращения, а для генераторов с самовозбуждением — также при температуре, близкой к рабочей.

Частоту вращения электродвигателя при холостом ходе определяют при номинальном напряжении в цепи якоря и номинальном токе возбуждения.

При этом температура обмотки возбуждения и подшипников должна быть близкой к рабочей. Если двигатель имеет последовательное возбуждение, то опыт проводят при независимом возбуждении.

Проверка коммутации при номинальной нагрузке и кратковременной перегрузке по току. Коммутация машин постоянного тока оценивается степенью искрения (визуально) в соответствии со стандартом.

Для оценки класса коммутации или степени искрения установлена шкала, состоящая из пяти степеней: 1; 1,25; 1,5; 2 и 3 (см. табл. 6.1).

Допускаемая степень искрения зависит от условий работы машины и поэтому обычно указывается в стандартах или в техни-

ческих условиях на конкретные виды машин. Если степень искрения не оговорена, то считается, что при номинальном и нормальном режимах работы она должна быть не выше класса 1,5. При оценке степени искрения принимают во внимание искрение под сбегаящим краем щетки.

При кратковременной перегрузке по току не следует бояться возрастания при испытаниях искрения на одну степень, например с 1,25 до 1,5.

Если степень искрения не превышала 2, то спустя некоторое время восстановится степень искрения, соответствующая номинальной нагрузке.

Определение характеристик. Внешняя характеристика генератора — зависимость напряжения на выходе генератора от тока нагрузки $U = f(I)$.

Ее надо снимать при номинальном токе возбуждения (при независимом возбуждении) или нерегулируемом сопротивлении цепи возбуждения, соответствующем номинальному режиму (при параллельном возбуждении) при температуре обмоток, близкой к рабочей.

При снятии внешней характеристики ток нагрузки рекомендуется изменять от тока холостого хода до тока, равного 150 % номинального.

Изменение напряжения $\Delta U_{ном}$, в процентах, номинального значения $U_{ном}$ для любой точки характеристики определяют по формуле

$$\Delta U = |(U - U_{ном}) / U_{ном}| 100, \quad (6.98)$$

где U — напряжение в данной точке характеристики.

Регулировочная характеристика машины постоянного тока представляет собой зависимость тока возбуждения от тока нагрузки (при $U = const$).

Эта зависимость имеет две ветви: при уменьшении и увеличении тока нагрузки.

Обычно ограничиваются снятием одной ветви характеристики — при уменьшении тока нагрузки.

Однако если по стандарту или по техническим условиям необходимо снимать две ветви этой характеристики, то за регулировочную характеристику принимают кривую, каждая ордината которой является средней арифметической ординатой первой и второй ветвей.

При снятии регулировочной характеристики ток нагрузки рекомендуется регулировать от холостого хода до 150 % номинального.

Рабочая характеристика двигателя постоянного тока представляет собой зависимость частоты вращения от тока якоря при неизменном напряжении якоря и неизменном токе возбуждения

(при независимом возбуждении) или нерегулируемом сопротивлении цепи возбуждения, соответствующем номинальному режиму работы (при параллельном возбуждении). При снятии этой характеристики температура должна быть близка к рабочей. Для электродвигателей с независимым или параллельным возбуждением при снятии характеристики ток нагрузки регулируют от холостого хода до 150 % номинального. Для электродвигателей, имеющих последовательную обмотку возбуждения, минимальная нагрузка при снятии рабочей характеристики должна выбираться такой, чтобы частота вращения двигателя при ней не превышала допустимую.

Определение области безыскровой работы. Для улучшения коммутации в машинах постоянного тока используются добавочные полюсы.

При испытаниях машины важно установить, в каких пределах изменения МДС добавочных полюсов машина будет иметь безыскровую коммутацию при разных токах нагрузки (от холостого хода до номинальной нагрузки, а если можно, то и выше номинальной).

В результате определяют область безыскровой работы машины. Испытания проводят при номинальных частотах вращения.

Цель испытаний — определить для отдельных нагрузок в пределах от холостого хода до номинальной и выше верхний и нижний пределы отклонения тока в обмотке добавочных полюсов от соответствующего тока цепи якоря, при котором коммутация соответствует степени искрения 1.

Область безыскровой работы определяют при практически установленной температуре активных частей машины, соответствующей номинальному режиму работы.

Для крупных электрических машин мощностью свыше 500 кВт часто бывает трудно создать нагрузку, включая номинальную, на испытательном стенде, поэтому для таких машин можно определять области безыскровой работы и оценивать степени искрения в режиме короткого замыкания при номинальных частотах вращения.

Изменение МДС обмотки добавочных полюсов осуществляют одним из следующих способов.

Посторонний источник постоянного тока подключают к зажимам обмотки добавочных полюсов, включенной в общую цепь машины.

Если испытываемая машина высокого напряжения, то источник постоянного тока следует заземлить или надежно изолировать от земли.

При втором способе посторонний источник постоянного тока подключают к зажимам обмотки добавочных полюсов, которую в отличие от первого способа отключают от остальных цепей испытываемой машины.

В этом случае током дополнительного питания добавочных полюсов следует считать разность между током нагрузки в момент отсчета и током в обмотке добавочных полюсов. На время испытаний на добавочные полюсы накладывают временную обмотку, питаемую от постороннего источника постоянного тока. В этом случае измеренный в дополнительной обмотке ток должен быть пересчитан для определения тока подпитки по отношению к числу витков дополнительной обмотки и обмотки добавочных полюсов. Этот способ сложен и поэтому его применяют только при отсутствии возможности использования первых двух. У машин с сильными добавочными полюсами можно шунтировать обмотки добавочных полюсов сопротивлением.

Во всех случаях обмотку добавочных полюсов питают дополнительным током $\pm \Delta I$, который изменяют вначале в сторону плюса, а затем — в сторону минуса (от нулевого значения); в обоих случаях до появления искрения.

Испытания проводят при различных значениях тока якоря I_a , в результате получают два ряда точек, определяющих верхнюю 1 и нижнюю 2 границы области безыскровой работы машины (рис. 6.76).

Область, заключенная между этими границами, соответствует исчезновению искрения при изменении тока подпитки. В результате испытаний могут выявиться характерные области безыскровой работы. Зависимости, приведенные на рис. 6.76, *а*, свидетельствуют о том, что МДС обмоток добавочных полюсов недостаточна, так как средняя 2 линия отклоняется вверх от оси абсцисс. Если средняя линия отклоняется вниз от оси абсцисс (рис. 6.76, *б*), то это говорит о чрезмерном значении МДС добавочных полюсов.

Полученные в результате испытаний зависимости $\Delta I = f(I_a)$, позволяют сделать важный вывод: чем меньше отклонение средней линии 2 на рис. 6.76 от оси абсцисс, тем точнее выбор числа витков

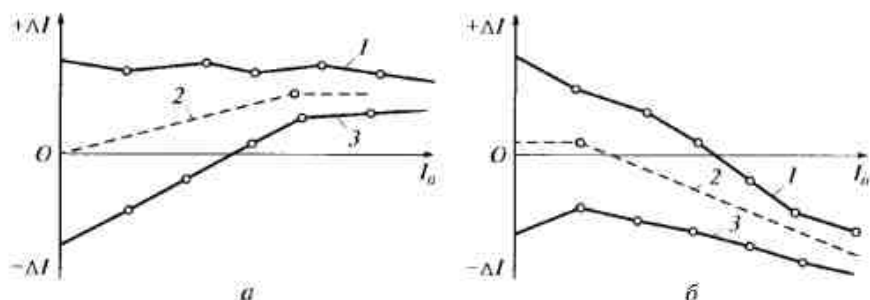


Рис. 6.76. Зона безыскровой работы при недостаточной (*а*) и избыточной (*б*) МДС добавочных полюсов:

1, 3 — изменение дополнительного тока в сторону полюса; 2 — средняя линия изменения дополнительного тока

добавочных полюсов и зазора между добавочными полюсами и якорем. Наилучшим является такое положение, когда средняя линия 2 совпадает с осью абсцисс (см. рис. 6.76). Исправлять зависимости, полученные в результате испытаний, надо следующим образом.

Зависимость, полученная на рис. 6.76, *а*, свидетельствует о том, что следует или добавить количество витков в обмотке добавочных полюсов, или уменьшить воздушный зазор под добавочным полюсом.

Зависимость, полученная на рис. 6.76, *б*, свидетельствует о том, что требуется уменьшить количество витков в обмотке добавочных полюсов или увеличить воздушный зазор. Другой важный показатель — ширина области безыскровой работы. Чем она больше, тем устойчивее и надежнее безыскровая работа машины при данной нагрузке.

Ширина области безыскровой работы зависит от многих факторов, в том числе и от ширины полюсных наконечников добавочных полюсов. На ширину области влияют также марки и размеры щеток, нажим щеткодержателей, состояние поверхности коллектора.

При проведении этих испытаний необходимо обращать особое внимание на приработку щеток и на состояние поверхности коллектора.

При нормальной работе поверхность коллектора должна иметь глянцевый цветной налет и на ней не должно быть следов подгара. При увеличении тока нагрузки одна из границ области безыскровой работы пересекает ось абсцисс (см. рис. 6.76). Это происходит, когда отклонение средней линии от оси абсцисс значительно, а ширина области безыскровой работы относительно невелика. После значения тока нагрузки, соответствующего точке пересечения оси абсцисс одной из границ области, дальнейшее увеличение тока нагрузки приводит к невозможности безыскровой работы машины без дополнительной подпитки добавочных полюсов токами одного и того же знака.

Быстрое сужение границ области при увеличении тока нагрузки — признак механической неисправности машины, вызывающей вибрацию щеток.

Кривизна средней линии области безыскровой работы является характерным показателем того, как компенсируется реакция якоря при разных нагрузках. Желательно, чтобы средняя линия была близка к прямой, иначе трудно сохранить безыскровую работу при изменении нагрузки.

Отклонение средней линии области безыскровой работы от оси абсцисс при изменении тока нагрузки обусловлено двумя основными причинами: насыщением ярма и сердечника якоря, а также влиянием поля главных полюсов на поле добавочных полюсов. Эти причины стремятся устранить при проектировании машины постоянного тока.

Контрольные вопросы

1. На чем основан принцип работы машин постоянного тока?
2. Какие основные конструктивные элементы имеют машины постоянного тока и из каких материалов они выполнены?
3. Какие типы обмоток применяют в машинах постоянного тока?
4. Что такое реакция якоря, от чего она возникает и как влияет на работу машины?
5. Что называют коммутацией? Как ее улучшить?
6. Какие системы возбуждения используют в генераторах постоянного тока и как они влияют на характеристики генераторов?
7. Какие существуют методы пуска в ход и регулирования частоты вращения в машинах постоянного тока?
8. В каких случаях в машинах постоянного тока возникают переходные процессы?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гольдберг О.Д.* Испытания электрических машин / О.Д. Гольдберг. — М.: Высш. шк., 2000.
- Гольдберг О.Д.* Качество и надежность асинхронных двигателей / О.Д. Гольдберг. — М.: Энергия, 1968.
- Извекон В.И.* Проектирование турбогенераторов / В.И. Извекон, Н.А. Серихин, А.И. Абрамов. — М.: Изд-во МЭИ, 2005.
- История электротехники / под ред. И.А. Глебова.* — М.: Изд-во МЭИ, 1999.
- Копылов И.П.* Геоэлектромеханика / И.П. Копылов. — М.: Изд-во МЭИ, 2000.
- Копылов И.П.* Космическая электромеханика / И.П. Копылов. — М.: Высш. шк., 2005.
- Копылов И.П.* Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов. — М.: Высш. шк., 2001.
- Копылов И.П.* Электрические машины / И.П. Копылов. — М.: Высш. шк., 2004.
- Кудрин Б.И.* Электроснабжение промышленных предприятий / Б.И. Кудрин. — М.: Интермет, 2005.
- Осин И.Л.* Электрические машины автоматических устройств / И.Л. Осин, Ф.М. Юферов. — М.: Изд-во МЭИ, 2003.
- Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования / О.Д. Гольдберг, О.Б. Буль, И.С. Свириденко, С.П. Хелемская; под ред. О.Д. Гольдберга. — М.: Высш. шк., 2001.
- Проектирование электрических машин / О.Д. Гольдберг, И.С. Свириденко; под ред. О.Д. Гольдберга. — М.: Высш. шк., 2006.
- Рожкова Л.Д.* Электрооборудование электрических станций и подстанций / Л.Д. Рожкова, Л.К. Карнеева, Т.В. Чиркова. — М.: Изд. центр «Академия», 2004.
- Специальные электрические машины / под ред. Б.Л. Алиевского. В 2 кн. — М.: Энергоатомиздат, 1993.
- Управляемые подмагничиванием электрические реакторы / под ред. А.М. Брянцева. — М.: Знак, 2004.
- Читечин В.И.* Электрические машины / В.И. Читечин. — М.: Высш. шк., 1988.