

**С. А. ЛОБЗИН**

# **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

**УЧЕБНИК**

*Рекомендовано*

*Федеральным государственным автономным учреждением  
«Федеральный институт развития образования» (ФГАУ «ФИРО») в качестве учебника для использования в учебном процессе образовательных учреждений, реализующих программу СПО по специальности «Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования», ПМ.01 «Организация технического обслуживания и ремонта электрического и электромеханического оборудования», МДК.01.01 «Электрические машины и аппараты»*

*Регистрационный номер рецензии 191  
от 10 мая 2012 г. ФГАУ «ФИРО»*

2-е издание, стереотипное



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2016

УДК 621.3(075.32)  
ББК 31.2я723  
Л681

Рецензент —

зав. сектором Центра компьютерного обучения Колледжа  
многоуровнего профессионального образования Академии народного хозяйства  
при Правительстве Российской Федерации А. А. Соломашкин

**Лобзин С.А.**

Л681 Электрические машины : учебник для студ. учреждений  
сред. проф. образования / С.А.Лобзин. — 2-е изд., стер. — М. :  
Издательский центр «Академия», 2016. — 336 с.  
ISBN 978-5-4468-8808-5

Излагаются основы теории генераторов и двигателей постоянного тока, трансформаторов, асинхронных двигателей и синхронных машин. Уделяется значительное внимание физическим явлениям, на которых основаны принципы работы электрических машин и трансформаторов. Отмечаются общие свойства различных электрических машин.

Учебник может быть использован при изучении общепрофессиональной дисциплины ОП.10 «Электрические машины» по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств», а также при освоении профессионального модуля ПМ.01 «Организация технического обслуживания и ремонта электрического и электромеханического оборудования» (МДК.01.01) по специальности «Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования».

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

УДК 621.3(075.32)  
ББК 31.2я723

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

ISBN 978-5-4468-8808-5

© Лобзин С.А., 2012  
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2012  
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2012

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В учебнике принята следующая последовательность изучения материала: машины постоянного тока (общие вопросы, генераторы, двигатели); трансформаторы; машины переменного тока (общие вопросы, асинхронные двигатели, синхронные генераторы, синхронные двигатели). Рассматриваются также некоторые специальные типы машин. Затрагиваются вопросы, касающиеся перспектив развития электромашиностроения.

Уделяется значительное внимание физическим явлениям, понимание которых необходимо для уяснения принципов работы электрических машин и трансформаторов. В тексте имеются напоминания из курсов физики, математики, электротехники и технической механики, связанные с рассматриваемыми вопросами. Таким образом, в большинстве случаев отпадает потребность поиска сведений, необходимых для понимания изучаемого материала, в других учебных и справочных изданиях.

Автор стремился изложить материал таким образом, чтобы он был вполне доступен для самостоятельного изучения предмета.

В учебнике имеются указания на общие свойства различных электрических машин, а также на аналогии между различными явлениями. Дается много ссылок на предыдущие подразделы, рисунки и формулы. Для надлежащего усвоения курса студентам рекомендуется не пренебрегать этими ссылками, а также примечаниями и справками, приводимыми по ходу основного текста.

После каждой главы помещены вопросы, облегчающие усвоение дисциплины.

### **Общие сведения об электрических машинах и трансформаторах.**

Электрические машины используются для преобразования механической энергии в электрическую и электрической в механическую, для преобразования напряжения и его частоты и др. Работа электрических машин и трансформаторов основана на явлении электромагнитной индукции.

Машины, предназначенные для преобразования механической энергии в электрическую, называются *электрическими (электромашиными) генераторами*; электрические машины, предназначенные для обратного преобразования, называются *электродвигателями*. Машины, применяемые для преобразования рода тока (например, переменного тока в постоянный), преобразования частоты и числа фаз переменного тока, преобразования постоянного тока одного напряжения в постоянный ток другого напряжения, называются *электромашинными преобразователями*.

Электрическая машина имеет вращающуюся часть (ротор) и неподвижную часть (статор). Для электрических машин характерно свойство обратимости, заключающееся в том, что одна и та же машина может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

В зависимости от того, какого рода ток электрические машины генерируют или потребляют, различают машины переменного и постоянного токов.

*Машины переменного тока* подразделяются на синхронные и асинхронные. В тех и других машинах при их работе возникает вращающееся магнитное поле. Ротор синхронной машины вращается со скоростью, равной скорости вращения магнитного поля статора. Скорость вращения ротора асинхронной машины отличается от скорости вращения поля статора.

Машины переменного тока бывают однофазные и многофазные (чаще всего трехфазные); первые генерируют или потребляют однофазный ток, вторые — многофазный ток.

*Машины постоянного тока* снабжаются коллектором. В генераторе коллектор служит для получения ЭДС постоянного направления,

а в двигателе — для переключения токов в секциях обмотки ротора (якоря) таким образом, чтобы обеспечить вращающий момент неизменного направления.

Имеются машины, объединяющие в своей конструкции и принципах работы особенности машин различных типов. Так, например, замечательными свойствами обладают *асинхронизированные синхронные машины*, которые используются на практике (пока еще не очень широко) и в качестве генераторов, и в качестве двигателей, а также для преобразования частоты.

Другой пример машин расширенной области использования — *универсальные коллекторные двигатели*, работающие от сети переменного или постоянного токов. Коллекторные двигатели дают возможность получать значительно более высокую скорость вращения, чем синхронные и асинхронные машины, и выполнять регулировку скорости в широких пределах. Область применения их, однако, ограничена высокой стоимостью, сложностью обслуживания и относительно низкой надежностью в работе.

Отметим, что приведенная здесь краткая классификация электрических машин не исчерпывает всего их многообразия.

В одном курсе с электрическими машинами принято изучать *трансформаторы*, не являющиеся машинами по смыслу термина. Трансформатор представляет собой статический аппарат, не имеющий вращающейся части и предназначенный, прежде всего, для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения. Принцип работы трансформатора, как и электрических машин, основан на явлении электромагнитной индукции, а уравнения, описывающие его свойства, аналогичны уравнениям электрических машин, в частности, асинхронных двигателей. Схемы замещения и векторные диаграммы трансформаторов и асинхронных двигателей вполне аналогичны.

Аналогия между электрическими машинами и трансформаторами особенно ярко выражена в конструкции и принципе работы индукционного регулятора и фазорегулятора. Эти аппараты представляют собой специально выполненные асинхронные двигатели, используемые при заторможенном роторе, который способен, однако, поворачиваться на произвольные углы в пределах  $360^\circ$ .

Существует большое число типов трансформаторов, имеющих различное назначение. Силовые трансформаторы общего применения используются в линиях передачи и распределения электроэнергии. Электроэнергия генерируется на электростанциях при напряжениях в десятки киловольт, но для экономичной передачи энергии на большие расстояния применяется значительно более высокое

напряжение. Для повышения напряжения применяются силовые повышающие трансформаторы. Вблизи потребителей, для питания которых обычно требуется напряжение в сотни вольт, устанавливаются силовые понижающие трансформаторы.

К трансформаторам специального назначения относятся силовые специальные (выпрямительные, сварочные, печные, радиотрансформаторы), измерительные и испытательные трансформаторы, трансформаторы для преобразования числа фаз, формы кривой ЭДС, частоты и т. д.

### **Сведения из истории вращающихся электрических машин.**

В 1821 г. английский физик и химик Майкл Фарадей установил, что электрический ток, проходящий по проводнику, может заставить этот проводник совершать вращение вокруг магнита или вызывать вращение магнита вокруг проводника. Таким образом, опыт М. Фарадея являлся наглядной иллюстрацией принципиальной возможности построения электродвигателя. В 1831 г. М. Фарадей показал возможность «превращения магнетизма в электричество», открыв тем самым явление электромагнитной индукции, на котором основаны принципы действия электрических машин и трансформаторов.

В следующем году, 1832 г., российский физик Эмилий Христианович Ленц установил правило определения направления ЭДС индукции и индукционного тока, что позволило ему сформулировать принцип обратимости генераторного и двигательного режимов электрической машины.

В том же году анонимным изобретателем был создан первый однофазный синхронный многополюсный генератор.

В 1834 г. американский физик Джозеф Генри опубликовал статью «О качательном движении, производимом магнитным притяжением и отталкиванием», в которой он описал построенный им электродвигатель. В этом устройстве впервые была сделана попытка использовать притяжение разноименных и отталкивание одноименных магнитных полюсов для получения непрерывного движения (в данном случае, колебательного).

В том же году российский физик Борис Семенович Якоби построил и описал первый двигатель постоянного тока с вращательным движением якоря. Двигатель питался от батареи гальванических элементов. Возбуждение машины осуществлялось от постоянных магнитов.

В 1838 г. Э. Х. Ленц осуществил на практике обратимость электрической машины постоянного тока, заставив ее работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Однако использование

принципа обратимости в широких масштабах началось лишь с 70-х гг. XIX века.

В 40-х гг. XIX в. Б. С. Якоби создал множество конструкций двигателей. Однако выполненные им испытания обнаружили, что при питании электродвигателей током от гальванических батарей механическая энергия получается чрезмерно дорогой; вследствие этого была признана крайняя неэкономичность электродвигателей. Необходимо отметить, что большим недостатком гальванических батарей является их малая энергоемкость (т. е. малая мощность, приходящаяся на единицу массы), вынуждавшая использовать очень большое число батарей, что для многих транспортных установок является неприемлемым. Произведенные опыты, а также теоретическое исследование электрической машины привели Б. С. Якоби к очень важному для практики выводу: разрешение вопроса о более или менее широком применении электродвигателей находится в прямой зависимости от удешевления электроэнергии, т. е. от создания генератора более экономичного, чем гальванические батареи. Первый генератор постоянного тока был построен Б. С. Якоби в 1842 г.

Некоторые из электродвигателей, построенных в 40—60-х гг. XIX в., действовали на принципе втягивания стального сердечника в соленоид; получавшееся при этом возвратно-поступательное движение преобразовывалось посредством балансира или кривошипно-шатунного механизма во вращательное движение вала, снабженно-го для равномерности хода маховыми колесами. Таковы, например, электродвигателя Пейджа и Бурбуза.

Итальянским ученым Антонио Пачинотти в 1860 г. был создан электродвигатель с кольцевым неявнополюсным якорем, вращающимся в магнитном поле электромагнитов. Главное значение работы Пачинотти состоит в том, что им был сделан важный шаг на пути построения современной машины постоянного тока: явнополюсный якорь был заменен неявнополюсным. К этому следует добавить удобную схему возбуждения и коллектор современного типа. Двигатель А. Пачинотти обладал практически постоянным вращающим моментом. А. Пачинотти указал на возможность обращения своего двигателя в генератор. Однако, не зная о возможности применения самовозбуждения машины, он рекомендовал для использования машины в режиме генератора заменить электромагниты постоянными магнитами. В 1863 г. А. Пачинотти продемонстрировал принцип обратимости электрических машин и выдвинул идею о возможности использования электрических генераторов постоянного тока для электролитического получения металлов (электролиза) и передачи электрической энергии на большие расстояния.

В 1867 г. Зеноб Теофиль Грамм, родившийся в Бельгии и работавший во Франции, построил первый надежный и удобный в эксплуатации электромашинный генератор, позволяющий получать относительно дешевую электроэнергию. С этого времени химические источники тока, обеспечивающие функционирование средств электросвязи, начали отходить на второй план.

Якорь генератора З. Грамма имел кольцевую конструкцию, как и в машине А. Пачинотти. Немецкий электротехник Фридрих фон Хефнер-Альтенек заменил кольцевой якорь барабанным, что вдвое увеличило мощность электромашины и значительно упростило ее конструкцию.

Основа для создания электрических многофазных машин переменного тока была заложена в 1879 г. английским ученым Уильямом Бейли, который получил вращающееся магнитное поле посредством поочередного подключения обмоток четырех стержневых электромагнитов к источнику постоянного тока. Первые устройства, принцип работы которых был основан на свойствах вращающегося магнитного поля, были описаны в работах Марселя Дебре (Франция, 1880 — 1883) и Элиа Томсона (США, 1887 г.).

Первый двухфазный асинхронный двигатель был изобретен в 1888 г. хорватским инженером Николой Тесла. Однако из-за плохих пусковых характеристик этот тип двигателя практического применения не получил, несмотря на то что двухфазная система переменного тока была реализована на крупнейшей электростанции XIX в.

В том же году русский электротехник Михаил Осипович Доливо-Добровольский построил трехфазный генератор переменного тока мощностью 2,2 кВт и асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, представлявшим собой полый медный цилиндр. КПД первых асинхронных двигателей оказался значительно ниже, чем у аналогичных по мощности двигателей постоянного тока.

С 1889 г. Н. Тесла занимался исследованием свойств высоковольтных энергетических систем и токов высокой частоты, что привело к изобретению в 1891 г. высокочастотных трансформаторов (трансформаторов Тесла) и электромеханических генераторов высокой частоты.

В 1889 г. М. О. Доливо-Добровольский получил патент на новую конструкцию короткозамкнутого ротора, получившего название «беличья клетка». Ротор был выполнен в виде стального цилиндра, а в просверленные по его периферии каналы были заложены медные стержни, которые электрически соединялись на лобовых частях ротора. Преимущество «беличьей клетки» перед медным ротором заключается в том, что наряду с малым электрическим сопротивле-



нием она имеет высокую магнитную проницаемость, т. е. низкое магнитное сопротивление, что повышает вращающий момент двигателя. Устройство «беличьей клетки» принципиально не изменилось вплоть до настоящего времени.

В 1890 г. М. О. Доливо-Добровольский запатентовал фазный ротор асинхронного двигателя, имеющий трехфазную обмотку с тем же числом секций, что и обмотка статора. Выводы обмотки фазного ротора соединяются через контактные кольца и щетки с пусковым реостатом. Фазный ротор позволяет значительно снизить пусковые токи и осуществлять плавное управление скоростью вращения.

Через два года М. О. Доливо-Добровольский предложил конструкцию ротора, названную «двойной беличьей клеткой». Такой ротор имеет существенно улучшенные пусковые характеристики. В 1898 г. французский инженер Поль Бушери усовершенствовал «двойную беличью клетку», после чего она начала широко применяться.

В 1891 г. на Всемирной электротехнической выставке во Франкфурте-на-Майне М. О. Доливо-Добровольский продемонстрировал первую в мире трехфазную систему передачи электроэнергии на расстояние около 170 км и предложил использовать трехфазный переменный ток в промышленности. Электропривод постоянного тока был быстро вытеснен электроприводом трехфазного переменного тока. Однако в течение долгого времени машины постоянного тока широко использовались в электроприводах прокатных станов, сварочных генераторах, в транспортных системах типа генератор — двигатель, а также в качестве возбудителей (источников магнитного потока) синхронных генераторов переменного тока. К концу XX в. машины постоянного тока стали утрачивать свое значение в последнем из упомянутых случаев; на смену им пришла ионная и полупроводниковая электроника.

В середине XX в. было установлено, что микродвигатели постоянного тока имеют более высокую точность и диапазон регулирования частоты вращения, чем микродвигатели переменного тока. После этого машины постоянного тока стали все более широко применяться в системах автоматического регулирования и в бытовых электрических устройствах.

Таким образом, машины постоянного и переменного токов постепенно заняли свои отдельные ниши; каждый из типов машин наиболее целесообразно применять в определенной области.

Наиболее важное применение машин переменного тока — выработка электроэнергии трехфазными синхронными генераторами: турбогенераторами на тепловых и атомных электростанциях и гидрогенераторами на гидроэлектростанциях. Синхронные генерато-

ры, имея сравнительно простую конструкцию, позволяют получать большие токи при достаточно высоком напряжении.

Современные генераторы изготавливаются с бесщеточной системой возбуждения и автоматической электронной регулировкой напряжения. При размерах генераторов в несколько метров их важнейшие детали изготавливаются с точностью до миллиметра.

В России постоянно растет общая мощность генераторов, установленных на электростанциях, что соответствует росту потребности в электроэнергии. Так, в 1998 г. установленная мощность российских электростанций составляла 198 млн кВт, а в 2010 г. эту цифру намерено увеличить до 232 млн кВт, из них 25 млн кВт будет вырабатываться турбогенераторами на атомных электростанциях (АЭС), около 157 млн кВт — турбогенераторами на тепловых электростанциях (ТЭС), около 50 млн кВт — гидрогенераторами гидроэлектростанций и гидроаккумулирующих электростанций (ГЭС и ГАЭС). Намеченные на период с 1999 по 2010 гг. вводы новых генерирующих мощностей на электростанциях с учетом замены оборудования, выработавшего свой ресурс, составят около 50 млн кВт.

Наконец, следует остановиться на асинхронизированных синхронных машинах, которые в последние годы все более широко осваиваются на российских электростанциях, в том числе на станциях ОАО «Мосэнерго». Разработка таких машин началась еще в 60-х гг. XX в. Существенный вклад в их разработку внес Михаил Моисеевич Ботвинник, доктор технических наук, известный всему миру как чемпион мира по шахматам. Асинхронизированные машины, или машины двойного питания, имеют раздельное питание обмоток статора и ротора, на которые подается напряжение разной частоты. Эти машины допускают несинхронные режимы работы. Основное преимущество асинхронизированных машин — это высокая, по сравнению с обычными синхронными машинами, устойчивость к выпадению из синхронизма, в том числе в режиме значительного потребления реактивной мощности. Свойства асинхронизированных машин наиболее ценны при работе в сложных энергосистемах.

**Сведения из истории трансформаторов.** Начало истории трансформаторов, после открытия Майклом Фарадеем явления электромагнитной индукции, можно связать с работами того же М. Фарадея и американского ученого Джозефа Генри, в которых впервые появились изображения будущего трансформатора (это было в 1831 г., т. е. в год открытия электромагнитной индукции). Однако ни тот, ни другой ученый не указали на такое свойство устройства, как способность изменять напряжение и ток.

В 1848 г. немецкий исследователь Генрих Даниель Румкорф изобрел индукционную катушку, которая явилась прообразом трансформатора.

Датой рождения первого трансформатора считается 30 ноября 1876 г., когда Павел Николаевич Яблочков получил патент на его изобретение. Трансформатор Яблочкова имел разомкнутый сердечник; он представлял собой стержень, на который наматывались обмотки.

Первые трансформаторы с замкнутыми сердечниками были созданы в Англии в 1884 г. братьями Джоном и Эдуардом Гопкинсонами.

В 1885 г. американским инженером Вильямом Стенли был создан первый автотрансформатор.

В 1889 г. М. О. Доливо-Добровольский построил первый трехфазный трансформатор.

В том же году Д. Свинберн предложил применить масляное охлаждение для сердечника и обмоток трансформатора.

В начале 1900-х гг. английский исследователь-металлург Роберт Хедфилд провел серию экспериментов для установления влияния различных добавок на свойства железа. Через несколько лет он поставил заказчикам первую тонну трансформаторной стали с добавками кремния.

1928 г. можно считать годом начала производства силовых трансформаторов в нашей стране, когда начал работать Московский трансформаторный завод (впоследствии — Московский электрозавод).

Крупный скачок в технологии производства сердечников трансформаторов был сделан в начале 30-х гг. XX в., когда американский металлург Норман П. Гросс установил, что при комбинированном воздействии проката и нагревания у кремнистой стали появляются замечательные магнитные свойства в направлении проката: магнитная проницаемость возрастает в 5 раз, а потери на гистерезис сокращаются в 4 раза.

В настоящее время известны тысячи разнообразных конструкций трансформаторов — от миниатюрных до гигантских, для транспортировки которых требуются специальные железнодорожные платформы или мощные плавучие средства.

На большинстве энергетических объектов установлены масляные трансформаторы. Однако они взрывоопасны. Взрыв такого трансформатора приводит к пожарам из-за выброса горячего масла. Им на смену приходят взрывобезопасные сухие трансформаторы. Они не выделяют токсичных и коррозионных газов, экономичны и влагостойки.

Дальнейшее развитие трансформаторов связано, в частности, с применением новых классов магнитных материалов — аморфных и нанокристаллических сплавов. Сердечники, изготовленные из них, характеризуются весьма малыми потерями, высокими значениями начальной и максимальной магнитной проницаемости и индукции насыщения на высоких частотах. Уже сейчас аморфные сплавы получили широкое распространение в радиоэлектронной аппаратуре, широкополосных трансформаторах устройств связи, импульсных трансформаторах с мощностью импульса до десятков мегаватт при частотах от 0,5 МГц и выше, в измерительных трансформаторах тока и напряжения, в согласующих трансформаторах и т. д.

Огромные перспективы на пути увеличения мощности силовых трансформаторов открываются при использовании сверхпроводниковой технологии.

# МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

## I

### РАЗДЕЛ

- Глава 1. Общие вопросы
- Глава 2. Генераторы постоянного тока
- Глава 3. Двигатели постоянного тока

## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

### 1.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Поступательное движение проводника в однородном магнитном поле.** Пусть между полюсами постоянного магнита поместили проводник перпендикулярно силовым линиям магнитного поля (рис. 1.1). Будем считать, что в пределах полюсов магнитное поле однородно и характеризуется индукцией  $B$ , а за пределами полюсов поле отсутствует. На рис. 1.1 направление силовых линий магнитного поля (линий магнитной индукции) показано диагональными крестиками (линии входят в чертеж перпендикулярно ему), а область магнитного поля ограничена штриховой линией.

Пусть под действием внешней силы  $\vec{F}$  проводник перемещается со скоростью  $v$  перпендикулярно как силовым линиям магнитного поля, так и самому проводнику. Перемещение рассматриваемого проводника происходит, как показано на рис. 1.1, по двум параллельным проводам, как по направляющим. Известно, что если движущийся проводник пересекает силовые линии магнитного поля, то в этом проводнике наводится электродвижущая сила (ЭДС), называемая *ЭДС индукции*.

ЭДС индукции  $E$  зависит от индукции магнитного поля  $B$ , скорости движения проводника  $v$ , а также от *активной длины проводника*  $l$  (от длины участка проводника в пределах магнитного поля):

$$E = Blv. \quad (1.1)$$

В таком виде выражение ЭДС справедливо в описанном ранее случае: активная часть проводника расположена перпендикулярно линиям магнитной индукции, а скорость движения проводника перпендикулярна самому проводнику и линиям магнитной индукции. Выражение (1.1) можно рассматривать как форму представления закона электромагнитной индукции.

Направление ЭДС индукции, возникающей в движущемся проводнике, определяют *по правилу правой руки*:

- ладонь располагают так, чтобы в нее под прямым углом входили силовые линии магнитного поля;
- большой палец, отогнутый под прямым углом к остальным четырем вытянутым пальцам, ориентируют в направлении скорости движения проводника;
- четыре пальца указывают направление ЭДС.

Если рассматриваемый проводник включить в замкнутую цепь, выходящую за пределы магнитного поля, то под действием ЭДС индукции по цепи потечет электрический ток. На рис. 1.1 эта цепь образована двумя параллельными проводами-направляющими и приемником энергии сопротивлением  $R$ . Направление тока  $I$  в замкнутой цепи совпадает с направлением ЭДС.

Итак, в рассматриваемом проводнике при его движении возникает электрический ток. Но на проводник с током, помещенный в магнитное поле, действует *электромагнитная сила*  $\vec{F}_{\text{эм}}$ , называемая также силой Ампера. В данных условиях, когда направление тока перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, величина электромагнитной силы определяется выражением

$$F_{\text{эм}} = BIl. \quad (1.2)$$

Направление электромагнитной силы определяют *по правилу левой руки*:

- ладонь левой руки располагают так, чтобы в нее под прямым углом входили силовые линии магнитного поля;
- четыре вытянутых пальца ориентируют в направлении тока;
- палец, отогнутый под прямым углом к остальным четырем пальцам, указывает направление электромагнитной силы.

Применив правило левой руки к рассматриваемому проводнику с током, выясняем, что сила  $\vec{F}_{\text{эм}}$  направлена против внешней силы  $\vec{F}$  (и против скорости движения проводника).

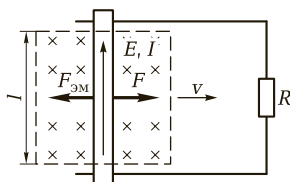


Рис. 1.1. Схема действия генератора

Согласно *второму закону Ньютона*, равнодействующая сил, действующих на тело, сообщает этому телу ускорение, пропорциональное равнодействующей. Если ускорение тела равно нулю (т. е. если скорость тела постоянна), то равнодействующая сил также равна нулю. В рассматриваемом случае, если скорость  $v$  проводника постоянна, равнодействующая внешней и электромагнитной силы равна нулю. Поскольку силы  $\vec{F}$  и  $\vec{F}_{\text{эм}}$  противоположно направлены, то указанное условие выполняется при равенстве модулей этих сил:

$$F = F_{\text{эм}}. \quad (1.3)$$

Итак, в рассматриваемой модели (см. рис. 1.1) существенны два процесса:

- возникновение тока под действием ЭДС индукции, наведенной в проводнике, который пересекает линии индукции магнитного поля;
- возникновение электромагнитной силы, действующей на проводник, в котором возник ток; направление этой силы противоположно внешней силе, перемещающей проводник.

Возникновение тормозящей электромагнитной силы, сопровождающей индукционный ток, свидетельствует о том, что *для выработки электрической энергии необходимо приложение внешней силы, преодолевающей электромагнитную силу*. Это согласуется с законом сохранения энергии. Явления, описанные ранее, иллюстрируют процесс превращения механической энергии в электрическую.

Перепишем равенство модулей сил (1.3) с учетом выражения (1.2):

$$F = BIl. \quad (1.4)$$

Из курса физики известно, что механическая мощность силы, действующей на тело в направлении его движения, может быть выражена как произведение этой силы на скорость движения:  $P_{\text{мех}} = Fv$ . (Напомним, что мощность выражает работу, произведенную силой за единицу времени.) Тогда, умножая обе части выражения (1.4) на скорость, получаем

$$P_{\text{мех}} = BIlv.$$

Поскольку, согласно формуле (1.1),  $E = Blv$ , имеем

$$P_{\text{мех}} = EI = P_{\text{эм}}, \quad (1.5)$$

где  $P_{\text{эм}}$  — *электромагнитная мощность*. (Вспомним из курса электротехники, что мощность источника электроэнергии выражается именно так:  $P_{\text{и}} = EI$ .)



Выражение (1.5) показывает, что *механическая мощность проводника при его движении в магнитном поле преобразуется в электромагнитную мощность.*

**Модель генератора постоянного тока.** Рассмотрим теперь, как описанные процессы используются в генераторе постоянного тока на примере простой модели, показанной на рис. 1.2, *а*. В поле постоянного магнита вращается с помощью какого-либо первичного двигателя якорь, состоящий из цилиндрического сердечника и размещенного на нем проводящего витка. В активных сторонах витка, расположенных вдоль полюсов, наводится ЭДС индукции. Показанное на рис. 1.2 направление ЭДС в каждой активной стороне определено по правилу правой руки с учетом направления силовых линий магнитного поля (оно отмечено штриховыми линиями со стрелками) и направления движения активной стороны (ЭДС, как и ток, обозначена строчной буквой по традиции обозначения мгновенного значения переменной величины). Когда активная сторона переходит при своем движении из области северного полюса *N* магнита в область южного полюса *S*, направление ЭДС в ней изменяется на противоположное (в области северного полюса ЭДС направлена на нас, а в области южного полюса — от нас).

График зависимости от времени мгновенного значения ЭДС одной из активных сторон витка показан на рис. 1.2, *б* (вверху). При надлежащей форме полюсных наконечников магнита эта зависимость синусоидальна:

$$e = E_m \sin \omega t = E_m \sin 2\pi f t, \quad (1.6)$$

где  $E_m$  — амплитуда ЭДС;  $\omega$  — угловая частота ЭДС, рад/с;  $f$  — частота ЭДС, Гц.

Мгновенное значение ЭДС становится равным амплитудному значению в момент прохождения активной стороной витка середины полюса (именно этот момент показан на рис. 1.2, *а*). Действительно, проводник пересекает линии магнитного поля с наибольшей частотой при прохождении им верхней (или нижней) точки. Нулевые же значения ЭДС принимает при движении активной стороны *вдоль* линий поля, а это имеет место, когда рамка расположена горизонтально (в рассматриваемой конфигурации).

Полный цикл изменения ЭДС происходит за один оборот якоря, поэтому частота ЭДС равна частоте вращения якоря, если частоту вращения измерять в оборотах в секунду, а частоту ЭДС — в герцах, т. е. в числе колебаний в секунду. Частоту вращения, однако, принято измерять *в оборотах в минуту* и обозначать буквой *n*. Тогда

$$n [\text{об/мин}] = 60f [\text{Гц}]. \quad (1.7)$$

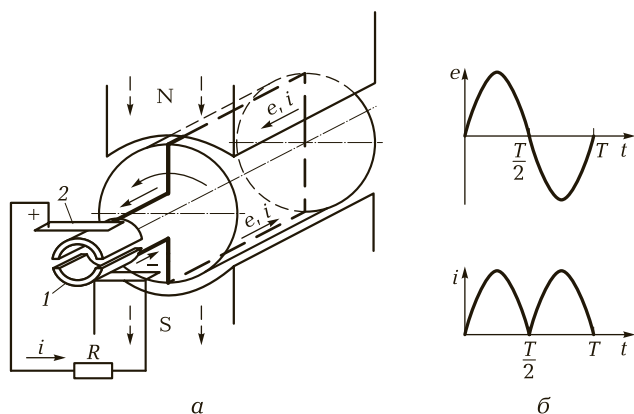


Рис. 1.2. Модель генератора постоянного тока:

*a* — устройство: 1 — полукольцо (коллекторная пластина); 2 — скользящий контакт (щетка); *б* — графики зависимости от времени ЭДС, индуцируемой в активной стороне витка, и тока нагрузки

Период изменения ЭДС ( $T$ , с) является величиной, обратной частоте ЭДС:  $T = 1/f$ . Заметим, что выражение (1.7) справедливо только в том случае, если электрическая машина имеет два полюса.

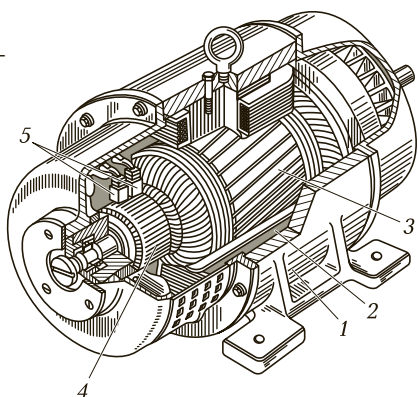
Для получения *неизменного по направлению тока*, питающего приемник энергии сопротивлением  $R$ , используется *коллектор*, который в рассматриваемой модели представлен двумя полукольцами 1, вращающимися на валу вместе с якорем. Цепь приемника соединяется с полукольцами посредством неподвижных скользящих контактов — *щеток* 2. Верхняя (по рисунку) щетка является положительной, так как ток течет по внешней цепи от нее; нижняя щетка — отрицательная: ток внешней цепи течет к ней. В процессе вращения якоря с каждой щеткой через полукольца контактирует то одна, то другая активная сторона витка, чем и обеспечивается неизменность направления тока во внешней цепи, в то время как ток каждой активной стороны изменяет направление каждые полпериода.

В момент, когда ЭДС в сторонах витка равны нулю, полукольца замыкаются щетками накоротко.

## 1.2. КОНСТРУКЦИЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Основные части машины постоянного тока** показаны на рис. 1.3: статор 1 (неподвижная часть машины) включает в себя стальную станину, по которой замыкается магнитный поток машины, главные полюсы 2, создающие основной магнитный поток, а также

Рис. 1.3. Машина постоянного тока:  
 1 — статор; 2 — полюс; 3 — якорь; 4 — коллектор; 5 — щеткодержатели со щетками



добавочные полюсы, не показанные на рис. 1.3. В якоре 3, вращающемся на валу от первичного двигателя, происходит превращение механической энергии в электрическую — работа машины в режиме генератора.

Если же первичный двигатель отсутствует, а обмотка якоря подключена к источнику постоянного напряжения, то происходит обратное превращение энергии, т. е. работа машины осуществляется в режиме двигателя. Вал удерживается в подшипниках, укрепленных в щитах станины. Коллектор 4, как и якорь, установлен на валу. Коллектор предназначен для преобразования переменного тока в постоянный. Электрическое соединение внешней цепи с пластинами коллектора происходит через неподвижные щетки, установленные в щеткодержателях 5.

Рассмотрим отдельные части машины более подробно.

**Полюсы и якорь.** На рис. 1.4 показаны главный и добавочный полюсы (назначение добавочных полюсов будет рассматриваться далее). Сердечники полюсов 1 делают *шихтованными*: их набирают из листов электротехнической стали, характеризующейся высокой магнитной проницаемостью. Толщина отдельного листа составляет 1...2 мм. Листы стянуты шпильками и изолированы между собой оксидной пленкой. Шихтованное устройство сердечников значительно ослабляет наводимые вихревые токи. Сердечники главных полюсов оканчиваются полюсными наконечниками, которые выполняют так, чтобы воздушный зазор между ними и якорем увеличивался от середины полюса к его краям. Это обеспечивает необходимое распределение магнитной индукции в воздушном зазоре. Величина воздушного зазора составляет менее 1,5 мм.

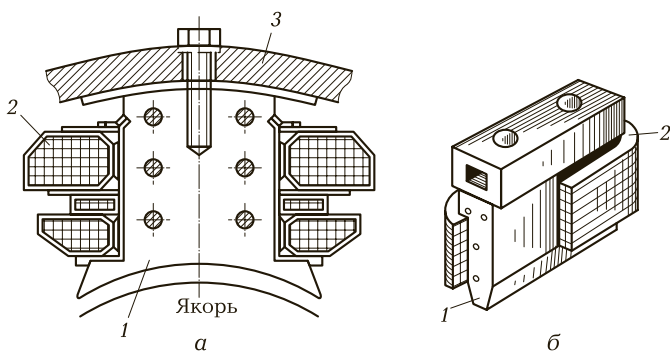


Рис. 1.4. Полюсы машины постоянного тока:

*а* — главный полюс; *б* — добавочный полюс; 1 — сердечник полюса с полюсным наконечником; 2 — полюсная катушка; 3 — станина

Полюсные катушки 2 выполняют из медного провода. Катушки изолируют от сердечника. На рис. 1.4, *а* показана катушка, разделенная по высоте на части. Между частями катушки оставляют вентиляционные каналы, что обеспечивает более интенсивное охлаждение катушки и сердечника в процессе работы.

По проводам катушек главных полюсов течет *ток возбуждения* магнитного поля. При *независимом возбуждении* машины постоянного тока для создания тока возбуждения используется отдельный источник постоянного напряжения малой мощности. При *самовозбуждении* генератора ток возбуждения является частью тока якоря. В различных схемах возбуждения двигателя один и тот же источник питает как обмотку якоря, так и обмотку возбуждения. Схемы возбуждения машин постоянного тока рассмотрены в гл. 2 и 3.

Полюсы крепятся к станине 3 с помощью болтов.

Якорь машины постоянного тока показан на рис. 1.5. Сердечник якоря (рис. 1.5, *а*) представляет собой цилиндр, имеющий, как и полюсы, шихтованную конструкцию: он набран из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Листы сердечника покрыты изоляционным лаком и имеют зубцы, пазы и вентиляционные отверстия (рис. 1.5, *б*). Пакет листов удерживается в сжатом состоянии нажимными шайбами. В пазах сердечника укладываются провода обмотки якоря (рис. 1.5, *в*), соединяемые друг с другом по определенным схемам, которые будут рассматриваться в последующих подразделах. Обмотка якоря изолируется от пазов и крепится в них клиньями (из текстолита или гетинакса) или бандажами (из проволоки или стеклоленты).

Электротехническая сталь, из которой изготавливаются сердечники полюсов и якоря, является *магнитомягким* материалом, имеющим малую *остаточную намагниченность*. Это означает, что магнитное поле сердечника, изготовленного из такого материала, ослабляется весьма значительно, когда по обмоткам, помещенным на сердечнике, прекращает течь ток.

**Коллектор и щетки.** Рассмотрим теперь важный узел машины, который обеспечивает преобразование переменного тока в ток одного направления, а также электрическое соединение между обмоткой вращающегося якоря и неподвижной цепью приемника энергии.

При использовании коллектора, состоящего из двух полуколец (коллекторных пластин), по цепи приемника энергии течет пульсирующий ток одного направления. Немного усложним модель, показанную на рис. 1.2, *а*. Во-первых, поместим на сердечнике якоря не один, а два проводящих витка, смещенных в пространстве друг относительно друга на угол  $90^\circ$ . Естественно, что при вращении такого якоря в поле магнита ЭДС в двух витках будут также сдвинуты друг относительно друга на фазный угол  $90^\circ$  (в одном из витков ЭДС будет принимать максимальное значение спустя четверть периода

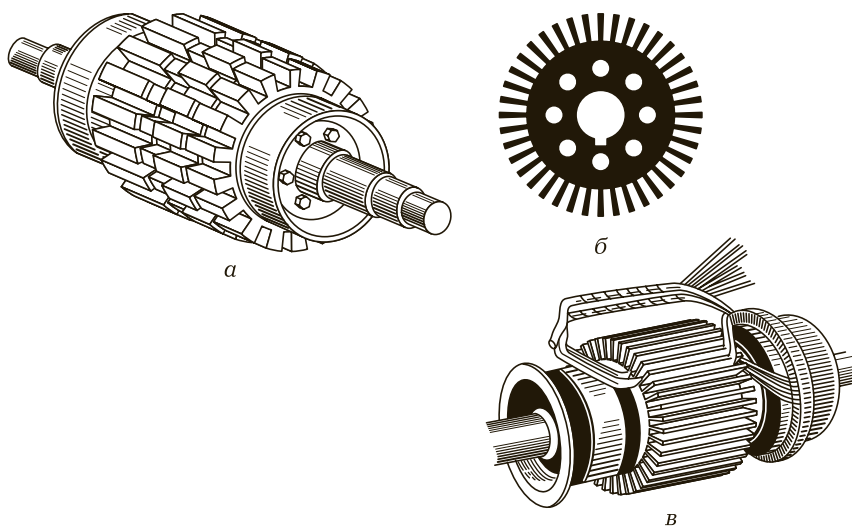


Рис. 1.5. Якорь машины постоянного тока:

*а* — сердечник якоря; *б* — отдельный лист сердечника; *в* — размещение секции обмотки в пазах якоря

после максимума ЭДС в другом витке). Изготовим коллектор, состоящий не из двух, а из четырех коллекторных пластин. Каждая пластина, соединенная с одним концом витка, будет теперь представлять собой дугу в четверть окружности, а не в половину окружности. Число щеток в новой модели оставим равным двум. Разместим щетки так, чтобы они имели контакт с пластинами того витка, в котором в данный момент ЭДС имеет наибольшее значение. При вращении якоря щетки переходят с коллекторных пластин одного витка на коллекторные пластины другого витка; при этом значительную часть времени каждая щетка контактирует одновременно с двумя соседними коллекторными пластинами. В результате пульсация тока, текущего по приемнику энергии, существенно уменьшается по сравнению с моделью, в которой имеются только две коллекторные пластины. (Подробнее процесс перехода щетки с одной коллекторной пластины на другую рассмотрен далее, см. подразд. 1.7.)

При дальнейшем увеличении числа коллекторных пластин (и числа витков обмотки якоря) пульсация тока уменьшается еще в большей степени. В частности, если в машине с одной парой магнитных полюсов использовать коллектор, состоящий из 16 пластин (соответственно увеличив и число витков), пульсация тока станет меньше 1 %, т. е. мы получим ток, постоянный не только по направлению, но и по значению.

К о л л е к т о р (рис. 1.6, а) помещен на вал машины и изолирован от вала. Основными элементами конструкции коллектора являются медные коллекторные пластины, выполненные в форме «ласточкина хвоста» (такая форма обеспечивает удобство монтажа и прочность крепления). К выступам коллекторных пластин, которые называют «п е т у ш к а м и», припаивают концы проводов, составляющих обмотку якоря. Коллекторные пластины изолируют друг от друга миканитовыми прокладками (миканит — изоляционный материал на основе слюды).

К поверхности коллектора прилегают угольные или графитовые щетки, через которые осуществляется скользящий контакт с внешней цепью. Щетки устанавливаются в щ е т к о д е р ж а т е л е (рис. 1.6, б). Механизм, состоящий из пружины и нажимной пластины, обеспечивает необходимое давление щетки на коллектор и компенсирует износ щетки.

На рис. 1.3 показаны три щеткодержателя 5 одной полярности, расположенные в ряд. Эти щеткодержатели соединяют между собой сборными шинами, присоединенными к зажимам машины.

Основные особенности конструкции машины постоянного тока рассмотрены на примере *двухполюсной машины*. Далее, при обсуж-

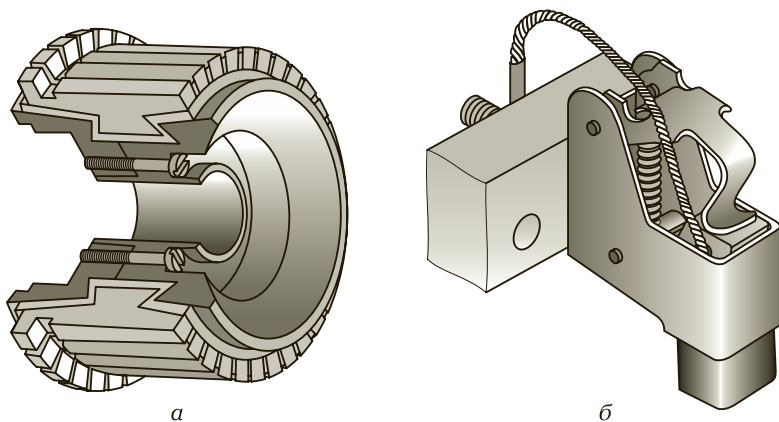


Рис. 1.6. Коллектор и щеткодержатель:  
а — устройство коллектора; б — щеткодержатель со щеткой

дении устройства обмоток якоря, мы должны будем распространить изложенные сведения и на многополюсные машины.

### 1.3. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБМОТКАХ ЯКОРЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Обмотка якоря представляет собой замкнутую систему проводников, уложенных в пазы якоря и соединенных между собой по определенной схеме. Обмотка состоит из секций.

Секция обмотки — это один или несколько последовательно соединенных витков (в последнем случае секция представляет собой катушку). В модели, показанной на рис. 1.2, а, обмотка якоря состоит всего из одной секции, а секция имеет один виток. Начало и конец секции присоединяют к двум различным коллекторным пластинам. Для придания секциям определенной формы они изготавливаются на специальном шаблоне.

Части секции, в которых наводится ЭДС, называются *активными сторонами*. Части секции, выступающие за пределы паза и соединяющие активные стороны, называются *лобовыми частями* (лобовыми соединениями). Активные стороны и лобовые соединения секций хорошо видны на рис. 1.5, в.

Активные стороны секции всегда находятся под разноименными полюсами статора. Если число главных полюсов машины равно двум

(т. е. если число пар полюсов  $p$  равно единице), то активные стороны секции располагаются в диаметрально противоположных пазах якоря. (На рис. 1.2, а и 1.3 показаны именно такие случаи.) Если же число полюсов равно четырем (т. е. если число пар полюсов  $p$  равно двум), то активные стороны размещаются через  $90^\circ$ , поскольку на этот же угол смещен полюс одной полярности относительно полюса другой полярности (главные полюсы машины всегда чередуются: N, S, N, S и т. д.).

Определим *полюсное деление*  $\tau$  как расстояние между серединами соседних главных полюсов, причем это расстояние измеряется по поверхности сердечника якоря. Если  $D$  — диаметр сердечника якоря, то длина окружности якоря составляет  $\pi D$ . Если число полюсов равно  $2p$ , то полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}. \quad (1.8)$$

Обмотки якоря выполняют *двухслойными*, т. е. в каждый паз укладывают две активные стороны двух разных секций: начальную (*нечетную*) сторону одной секции и конечную (*четную*) сторону другой секции. При этом нечетная сторона располагается в верхнем слое паза. После укладки активных сторон секций паз заклинивают сверху немагнитным клином.

Паз, содержащий только две активные стороны, называется *элементарным*. Реальный паз якоря машины постоянного тока может включать в себя и большее число активных сторон секций. Такой паз состоит из нескольких элементарных (рис. 1.7).

Поскольку секция обмотки якоря имеет две активные стороны и в каждом элементарном пазу уложены также две активные стороны (принадлежащие, однако, разным секциям), получается, что число элементарных пазов  $Z_e$  совпадает с числом секций обмотки  $Z_c$ . С каждой коллекторной пластиной соединено начало одной и конец другой секции, поэтому число коллекторных пластин  $Z_k$  также равно числу секций.

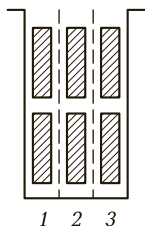


Рис. 1.7. Деление реального паза на элементарные (1, 2, 3) пазы



Если секция состоит из одного витка, то число активных проводов обмотки равно числу активных сторон секций. Очевидно, что это число в 2 раза больше числа секций. Если же секция имеет  $w$  витков, то число активных проводов  $N$  будет в  $w$  раз больше.

Сказанное объединим цепочкой равенств

$$Z_3 = Z_k = Z_c = \frac{N}{2w}. \quad (1.9)$$

## 1.4. ПЕТЛЕВЫЕ ОБМОТКИ

**Простая петлевая обмотка якоря.** Простая петлевая (параллельная) обмотка характеризуется тем, что концы каждой ее секции присоединены к соседним коллекторным пластинам.

Рассмотрим построение простой петлевой обмотки на примере генератора постоянного тока с двумя полюсами ( $p = 1$ ) и шестью коллекторными пластинами ( $Z_k = Z_c = 6$ ). На рис. 1.8, *a* указано направление линий индукции магнитного поля, созданного полюсами (это направление найдено с учетом направления тока обмотки по-

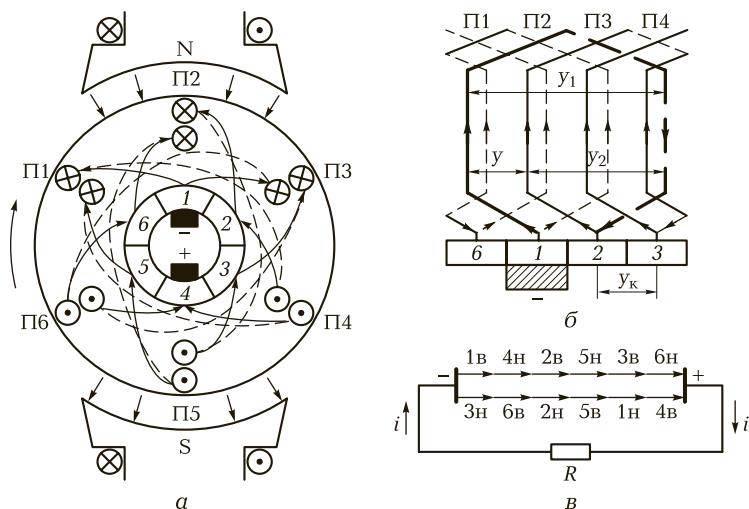


Рис. 1.8. Простая петлевая обмотка:

*a* — схема обмотки; *б* — фрагмент развернутой схемы; *в* — принципиальная схема обмотки якоря, соединенной с приемником электроэнергии

люсов по правилу правовинтового буравчика); указано также направление вращения якоря (вращение осуществляется первичным двигателем). По правилу правой руки определены направления ЭДС, наведенных в активных сторонах обмотки якоря. Эти направления совпадают с направлениями токов, если генератор подключен к приемнику энергии. Активные стороны размещены в пазах попарно. Передние лобовые соединения показаны сплошными линиями со стрелками, а задние — штриховыми линиями. Стрелки указывают направления токов в передних лобовых соединениях, соответствующие их направлениям в активных сторонах. Указанные полярности щеток (они изображены под коллекторными пластинами для удобства изображения) также соответствуют направлениям токов. Действительно, верхняя щетка имеет отрицательную полярность, так как из внешней цепи, не показанной на рис. 1.8, ток идет по направлению к этой щетке.

Проследим за построением отдельной секции обмотки, двигаясь в направлении тока от коллекторной пластины 1, контактирующей в данный момент с щеткой отрицательной полярности. Передняя лобовая часть секции соединяет коллекторную пластину 1 с активной стороной, уложенной в верхнем слое паза П1. Задняя лобовая часть этой секции идет от заднего торца этой активной стороны ко второй активной стороне, уложенной в нижнем слое паза П4. Передний торец второй активной стороны соединяется лобовой частью с коллекторной пластиной 2. Итак, секция начинается и заканчивается на соседних коллекторных пластинах, а ее активные стороны уложены в диаметрально противоположных пазах, т. е. находятся под полюсами противоположных полярностей. (В общем случае, если машина имеет  $p$  пар полюсов, центральный угол между пазами, в которых уложены активные стороны одной секции, равен  $180/p$ .)

На фрагменте развернутой схемы петлевой обмотки (рис. 1.8, б) рассмотренная секция показана жирной линией. Активные стороны, уложенные в верхнем слое пазов, даны на развернутой схеме сплошными линиями, а активные стороны, уложенные в нижнем слое, — штриховыми линиями.

На этом же рисунке обозначены:

- первый частичный шаг обмотки по якорю  $u_1$  — расстояние между активными сторонами одной и той же секции, измеряемое числом элементарных пазов;
- второй частичный шаг  $u_2$  — расстояние между *конечной* активной стороной данной секции и *начальной* активной стороной следующей секции;

- результирующий шаг  $y$  — расстояние между начальными сторонами следующих друг за другом секций;
- шаг по коллектору  $y_k$  — расстояние между серединами коллекторных пластин, к которым присоединены начало и конец данной секции; этот шаг измеряется в коллекторных делениях.

Для петлевой обмотки

$$y = y_1 - y_2; y_k = y. \quad (1.10)$$

Ранее было рассмотрено размещение частей одной секции, пройдя в направлении тока от коллекторной пластины 1 до коллекторной пластины 2. Для выяснения схемы соединения всех проводников обмотки якоря продолжим обход по схеме (см. рис. 1.8, а). На коллекторной пластине 2 начинается следующая секция, последовательно соединенная с рассмотренной. От пластины 2 попадем в верхний слой паза П2, от него — в нижний слой паза П5. Двигаясь далее по последовательно соединенным лобовым и активным частям секций, мы не обнаружим изменения направления тока до тех пор, пока из нижнего слоя паза П6 не дойдем до коллекторной пластины 4, которая контактирует с нижней щеткой. В этой точке находится узел электрической схемы, поскольку в ней сходятся три провода: два из них принадлежат лобовым соединениям двух секций, а третий идет от щетки во внешнюю цепь (на рис. 1.8, а этот провод не показан).

Дальнейший обход частей секций от коллекторной пластины 4 будет происходить против направления тока. Сначала мы попадем в верхний слой паза П4, затем в нижний слой паза П1 и т.д. Завершится обход соединением нижнего слоя паза П3 с коллекторной пластиной 1, откуда и началось рассмотрение обмотки. Эта коллекторная пластина, как и пластина 4, контактирует со щеткой и является узлом.

Видим, что по обоим проводам обмотки, соединенным с коллекторной пластиной 1, токи текут по направлению от пластины, а по обоим проводам, соединенным с коллекторной пластиной 4, токи текут по направлению к пластине. Что касается всех остальных пластин, то каждая из них является точкой соединения входящего и исходящего тока.

В результате рассмотрения схемы простой петлевой обмотки мы выявили наличие двух узлов и двух параллельных ветвей ( $2a = 2$ , где  $a$  — число пар параллельных ветвей), причем каждая ветвь включает в себя одинаковое число активных сторон. Принципиальная схема обмотки представлена на рис. 1.8, в, где числами, совпадающими

с номерами пазов, обозначены активные стороны секций; буква «в» указывает на размещение активной стороны в верхнем слое паза, буква «н» — в нижнем. Мгновенное значение ЭДС  $e$  генератора в рассматриваемый момент времени равно сумме ЭДС, индуцируемых в активных сторонах одной параллельной ветви:

$$e = e_{1в} + e_{4н} + e_{2в} + e_{5н} + e_{3в} + e_{6н} = e_{3н} + e_{6в} + e_{2н} + e_{5в} + e_{1н} + e_{4в}. \quad (1.11)$$

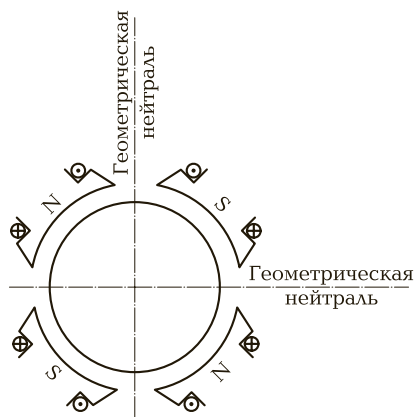
При повороте якоря на  $60^\circ$  коллекторная пластина  $б$  займет верхнее положение и будет контактировать с верхней щеткой, а коллекторная пластина  $з$  займет нижнее положение и будет контактировать с нижней щеткой. Принципиальная схема обмотки для этого момента времени будет отличаться от изображенной на рис. 1.8, в только номерами пазов. То же самое относится к изменению уравнения (1.11).

В промежуточный момент времени, а именно при повороте якоря на  $30^\circ$  относительно исходного положения, верхняя щетка будет замыкать накоротко коллекторные пластины  $б$  и  $1$ , а нижняя — коллекторные пластины  $з$  и  $4$ . На пластине  $б$  начинается и на пластине  $1$  заканчивается секция, активные стороны которой лежат в пазе П6 (верхний слой) и в пазе П3 (нижний слой). На пластине  $з$  начинается и на пластине  $4$  заканчивается секция, активные стороны которой лежат в пазе П3 (верхний слой) и в пазе П6 (нижний слой). Указанные секции оказываются замкнуты щетками накоротко. Из рис. 1.8, а видно, что при повороте якоря на  $30^\circ$  в направлении стрелки относительно положения, показанного на рисунке, пазы П3 и П6 оказываются на *геометрической нейтрали*, т. е. в плоскости, перпендикулярной к оси полюсов (при  $p = 1$ ), где наводимая ЭДС равна нулю (в идеальном случае). Таким образом, в рассматриваемый момент времени в замкнутых накоротко секциях ЭДС не наводится, и каждая из сумм в уравнении (1.11) уменьшается на два слагаемых. Из-за этого имеет место пульсация напряжения на зажимах генератора, но чем больше секций в каждой параллельной ветви, тем пульсация меньше.

При увеличении числа параллельных ветвей обмотки увеличивается *номинальный ток якоря*, поскольку при большем числе ветвей ток якоря, текущий во внешней цепи, делится внутри машины на большее число токов. (*Номинальными* называются величины, на которые рассчитана данная машина или данное устройство.) Число параллельных ветвей простой петлевой обмотки можно увеличить путем увеличения числа главных полюсов машины, поскольку число ветвей равно числу главных полюсов:  $2a = 2p$ .

**Многополюсная машина.** На рис. 1.9 показана схема четырехполюсной машины. Систему ее полюсов можно представить как две

Рис. 1.9. Схема четырехполюсной машины постоянного тока



системы полюсов двухполюсных машин, расположенных у одного якоря. При этом центральный угол между северным и южным полюсом каждой пары составляет  $90^\circ$ , а не  $180^\circ$ . Процессы, происходящие в двухполюсной машине в течение одного оборота якоря, в четырехполюсной происходят за пол-оборота. Если в каждой секции двухполюсного генератора цикл изменения ЭДС совершается в течение одного периода вращения якоря, то в секции четырехполюсного — в течение половины периода вращения.

Пропорционально числу полюсов увеличивается число устанавливаемых щеток, и в четырехполюсной машине имеется не две, а четыре щетки (или четыре ряда щеток). Каждая щетка устанавливается так, чтобы секция, замыкаемая ею, двигалась во время замыкания в области геометрической нейтрали. Щетки одного знака электрически соединяются между собой и подключаются к соответствующему зажиму машины.

Сказанное легко распространить на произвольное число полюсов  $2p$ .

**Сложная петлевая обмотка якоря.** Для получения большого числа ветвей без увеличения числа полюсов выполняют сложную петлевую (параллельную) обмотку. Она представляет собой совокупность нескольких ( $m = 2, 3, 4, \dots$ ) простых петлевых обмоток. Ширина щеток в таких машинах должна составлять не менее чем  $m$  коллекторных делений, и таким образом  $m$  простых обмоток включаются с помощью щеток параллельно. Отсюда следует, что число параллельных ветвей сложной петлевой обмотки составляет  $2a = 2pm$ . Обмотки такого типа применяют в машинах низкого напряжения с большими токами якоря, например в генераторах для электролиза.

**Симметрия обмоток и уравнительные соединения.** ЭДС, наводимые во всех параллельных ветвях обмотки якоря, должны быть равны между собой, иначе даже при отсутствии внешней нагрузки (в режиме холостого хода) в обмотке будет протекать ток, называемый *уравнительным током*. (То же самое происходит при параллельном соединении двух источников постоянного напряжения, имеющих разные ЭДС.) В результате протекания уравнительного тока нагревается обмотка якоря, а также увеличивается плотность тока под щетками, что приводит к искрению на коллекторе.

Для обеспечения равенства ЭДС параллельных ветвей необходимо соблюдение *условий симметрии обмотки якоря*:

- число проводников во всех пазах должно быть одинаковым;
- число пазов, в которые уложена каждая пара параллельных ветвей, должно быть одинаковым;
- число секций каждой пары параллельных ветвей должно быть одинаковым;
- каждая пара параллельных ветвей должна занимать одинаковое положение относительно системы главных полюсов, т. е. должна находиться в одинаковых магнитных условиях.

Однако уравнительные токи в петлевых обмотках возникают даже при соблюдении условий симметрии. Это происходит из-за асимметрии магнитной системы машины. Причиной асимметрии являются дефекты, возникающие при изготовлении машины (неравенство зазоров под различными полюсами, неточность центровки якоря, наличие раковин в отливке станины). Уравнительные токи, складываясь с током нагрузки, создают неравномерную нагрузку параллельных ветвей. Уравнительные токи проходят из одной параллельной ветви обмотки в другую через щетки. Чтобы уравнительные токи не замыкались через щетки, применяют электрическое соединение точек обмотки, которые имеют *теоретически равные потенциалы*. Эти точки выбирают либо на стороне коллектора, либо на лобовых частях обмотки на стороне, противоположной коллектору. Указанные соединения называют *уравнительными соединениями (уравнителями) первого рода*. Токи, замыкающиеся через уравнители первого рода, создают в обмотке магнитный поток, который стремится уменьшить асимметрию магнитной системы машины. Максимальное число уравнительных соединений составляет  $Z_k/p$ , т. е. равно числу коллекторных пластин, приходящихся на одну пару полюсов. Максимальное число уравнителей применяют только в мощных машинах;

в остальных случаях используют по одному или двум уравнивающим соединениям на каждый реальный паз.

В сложных обмотках, помимо уравнивающих соединений первого рода, предназначенных для выравнивания асимметрии магнитной системы, применяются также *уравнивающие соединения второго рода*, необходимость которых обусловлена неравенством переходных сопротивлений между щеткой и отдельными коллекторными пластинами. Простые обмотки, которые входят в состав сложной, включаются параллельно друг другу через щетки. При неравенстве упомянутых переходных сопротивлений ток нагрузки между простыми обмотками распределяется неравномерно, что приводит к неравномерному распределению напряжения между соседними коллекторными пластинами и вызывает искрение щеток. Уравнивающие соединения второго рода обеспечивают равномерность распределения тока между простыми обмотками, составляющими сложную обмотку. Эти соединения связывают между собой точки, принадлежащие разным простым обмоткам и имеющие теоретически одинаковый потенциал.

## 1.5. ВОЛНОВЫЕ ОБМОТКИ И ОБМОТКА СМЕШАННОГО ТИПА

**Простая волновая обмотка.** В простой волновой (последовательной) обмотке последовательно соединяются секции, начала которых лежат под следующими друг за другом одноименными полюсами (рис. 1.10). Шаги обмотки связаны уравнениями:

$$y = y_1 + y_2; y_k = y \quad (1.12)$$

(сравните с уравнениями (1.10) для петлевой обмотки).

В то время как в простой петлевой обмотке начало и конец каждой секции соединяются с соседними коллекторными пластинами, в простой волновой обмотке между начальной и конечной коллекторной пластиной каждой секции имеется расстояние

$$y_k = \frac{Z_k - 1}{p}, \quad (1.13)$$

где  $Z_k$  — число коллекторных пластин машины (см. подразд. 1.3).

Если в простой петлевой обмотке за один обход по якорю мы прослеживаем соединения всех секций между собой, то в простой волновой обмотке число секций, последовательно соединенных между собой в пределах одного обхода, равно числу пар полюсов  $p$  машины.

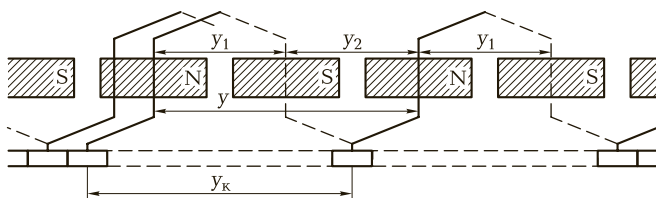


Рис. 1.10. Схема построения простой волновой обмотки (показан один обход по якорю и начало второго обхода)

Совершив один обход по якорю простой волновой обмотки, мы попадаем на коллекторную пластину, расположенную рядом с той пластиной, от которой был начат обход (слева от исходной пластины, см. рис. 1.10). И так, при завершении обхода мы не доходим до исходной пластины расстояние в одно коллекторное деление, отсюда в формуле (1.13) появилось число 1.

Затем совершим второй обход и окажемся еще на одну коллекторную пластину левее исходной. При совершении всех последующих обходов мы обойдем соединения со всеми коллекторными пластинами. Пластина, на которой мы закончим последний обход, будет смещена влево от исходной пластины на расстояние, определяемое формулой (1.13). После этого будет совершен заключительный шаг: еще одна секция соединит конец последнего обхода с исходной коллекторной пластиной.

Мы рассмотрели схему построения *неперекрещивающейся*, или *левоходовой*, обмотки. Если бы при завершении одного обхода по якорю мы пришли к коллекторной пластине, расположенной справа от исходной, то обмотка была бы *перекрещивающейся*, или *правоходовой*. Шаг по коллектору такой обмотки задается формулой, которая получается из формулы (1.13) заменой минуса на плюс. Перекрещивающаяся обмотка требует большего расхода обмоточного провода, чем неперекрещивающаяся, и практически не используется.

Характерной особенностью простой волновой обмотки является то, что число ее параллельных ветвей, независимо от числа полюсов машины, всегда равно двум:  $2a = 2$ . В одну параллельную ветвь включены все секции, начала которых расположены в пределах полюсных делений одной полярности, а в другую — в пределах полюсных делений другой полярности. В машине с такой обмоткой достаточно было бы применить только две щетки, удаленные друг от друга на одно полюсное деление. Однако в этом случае нарушается сим-



метрия обмотки: в каждой параллельной ветви оказывается разное число секций. Этот недостаток будет устранен, если число устанавливаемых щеток сделать равным числу полюсов машины. Щетки одной полярности соединяют между собой.

*Уравнительные соединения* в простой волновой обмотке не требуются, так как секции каждой параллельной ветви этой обмотки располагаются под всеми полюсами и неравенство отдельных магнитных потоков в одинаковой степени сказывается на ЭДС обеих параллельных ветвей.

**Сложная волновая обмотка.** Сложная волновая (сложноволновая) обмотка якоря состоит из  $m$  простых волновых обмоток, присоединенных к одному коллектору. Однократный обход якоря заканчивается не на соседней с исходной коллекторной пластине, а на пластине, удаленной от исходной на расстояние  $у_{\text{к}} = m$ . В такой обмотке, как и в сложной петлевой, щетки имеют ширину не менее  $m$  коллекторных делений и обеспечивают параллельное соединение простых обмоток. Поэтому число параллельных ветвей сложной волновой обмотки составляет  $2a = 2m$ , и применяется такая обмотка именно для увеличения числа параллельных ветвей, чтобы без увеличения сечения обмоточного провода обеспечить больший, по сравнению с простой обмоткой, ток якоря.

В сложных волновых обмотках, так же как и в сложных петлевых, применяют *уравнительные соединения второго рода*, и их необходимость обусловлена той же причиной, что и в сложных петлевых обмотках.

**Выбор типа обмотки.** Выбор типа обмотки (петлевая или волновая, сложная или простая) определяется главным образом значениями номинального тока якоря и номинального напряжения на зажимах машины. При одной и той же мощности машина постоянного тока, в зависимости от ее назначения, может характеризоваться высоким значением тока якоря и низким напряжением, или наоборот.

По значению номинального напряжения машины постоянного тока подразделяют на следующие классы:

- машины низкого напряжения ( $U_{\text{ном}}$  до 24 В);
- пониженного напряжения ( $U_{\text{ном}}$  в пределах 60 ... 80 В);
- нормального напряжения ( $U_{\text{ном}}$  в пределах 110 ... 220 В);
- повышенного напряжения ( $U_{\text{ном}}$  в пределах 440 ... 600 В);
- высокого напряжения ( $U_{\text{ном}}$  более 750 В).

Номинальный ток якоря определяется номинальной мощностью машины. Принята следующая ориентировочная классификация

номинальных мощностей машин постоянного тока: малая мощность — до 50 кВт; средняя — от 50 до 500 кВт; большая — свыше 500 кВт.

При повышенных значениях напряжения применяют волновую (последовательную) обмотку, ЭДС которой складывается из большого числа ЭДС активных сторон; при повышенных значениях тока — петлевую (параллельную), сумма токов параллельных ветвей которой дает ток якоря. Если простая петлевая или простая волновая обмотка не удовлетворяет получению требуемой мощности, применяют сложную петлевую, сложную волновую обмотку или обмотку смешанного типа, особенности которой рассмотрены далее.

**Обмотка смешанного типа.** В машинах большой мощности часто используется обмотка смешанного типа (комбинированная, лягушечья), которая представляет собой сочетание простой петлевой и сложной волновой обмоток. Такая обмотка располагается в пазах якоря в четыре слоя и присоединяется к общему коллектору. На рис. 1.11 показана одна секция такой обмотки и размещение ее активных сторон в пазах якоря. Сплошными линиями на рис. 1.11, а показаны стороны секции, уложенные в двух верхних слоях паза, а штриховыми линиями — стороны, уложенные в двух нижних слоях другого паза. Стороны, не пронумерованные на рис. 1.11, б, принадлежат другим секциям. При изготовлении обмотки смешанного типа к каждой коллекторной пластине припаивается четыре проводника, принадлежащие разным секциям.

Ток якоря должен равномерно распределяться между обмотками, поэтому число параллельных ветвей волновой и петлевой обмоток, составляющих смешанную обмотку, должно быть одинаковым. В простой петлевой обмотке, как отмечалось ранее, число параллельных ветвей  $2a$  равно числу полюсов  $2p$ ; в простой волновой обмотке

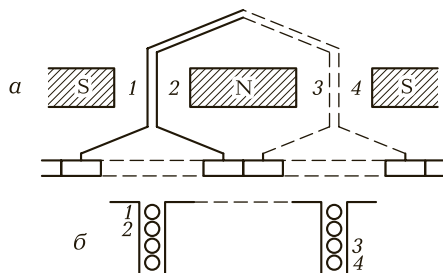


Рис. 1.11. Секция обмотки смешанного типа:

а — развернутая схема; б — размещение активных сторон в пазах

число ветвей равно двум; в сложной волновой обмотке оно равно  $2m$ , где  $m$  — число простых волновых обмоток, составляющих сложную. Из этого следует, что в обмотку смешанного типа должны быть включены простая петлевая обмотка и сложная волновая, у которой  $m = p$  (использование сложной петлевой обмотки в составе обмотки смешанного типа не оправдано).

Существенным достоинством рассматриваемой обмотки является отсутствие необходимости в уравнивательных соединениях: волновая обмотка играет роль уравнивательных соединений первого рода для петлевой обмотки, а петлевая — роль уравнивательных соединений второго рода для волновой.

## 1.6. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Реакцией якоря называется влияние магнитного поля, созданного током якоря, на результирующее поле машины.

**Реакция якоря в генераторе.** На рис. 1.12, *а* упрощенно показано магнитное поле главных полюсов генератора постоянного тока (толь-

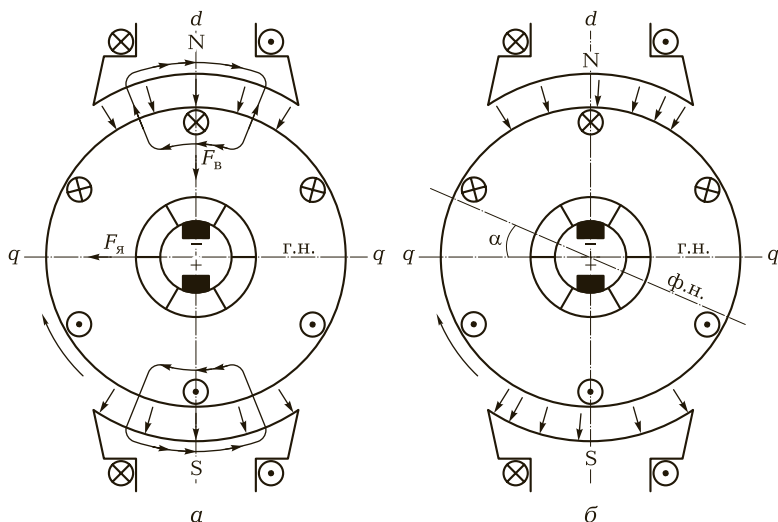


Рис. 1.12. Упрощенное изображение магнитных полей генератора постоянного тока:

*а* — поле главных полюсов и поле якоря; *б* — результирующее поле

ко в пределах воздушного зазора) и магнитное поле индукционного тока, текущего в проводниках обмотки якоря (только для активных сторон, находящихся под серединами полюсных наконечников). Направления силовых линий этих полей найдены по правилу буравчика.

Если внешняя нагрузка не подключена к зажимам генератора, то в обмотке якоря ток не течет (*режим холостого хода*) и магнитное поле машины представляет собой поле только главных полюсов.

В проводах якоря нагруженного генератора устанавливается ток, создающий свое собственное магнитное поле. Из рис. 1.12, а видно, что под левой стороной полюсного наконечника северного магнитного полюса линии поля якоря направлены противоположно линиям поля полюсов. Поэтому в данной области поле якоря ослабляет поле полюсов. То же самое справедливо и для воздушного зазора под правой стороной полюсного наконечника южного полюса. Имея в виду относительное движение полюсов и якоря, говорят, что *набегающий край полюса размагничивается магнитным потоком якоря*.

Под правой стороной полюсного наконечника северного полюса линии поля якоря сонаправлены линиям поля полюсов. Таким образом, в этой области поле якоря усиливает поле полюсов. То же самое выполняется и для воздушного зазора под левой стороной полюсного наконечника южного полюса. Итак, *сбегающий край полюса намагничивается магнитным потоком якоря*.

На рис. 1.12, б упрощенно изображено результирующее поле в воздушном зазоре генератора (результат сложения поля полюсов и поля якоря). Частота линий индукции результирующего поля отражает величину магнитной индукции  $B$ : под набегающим краем полюса поле ослаблено, а под сбегающим усилено.

Из-за насыщения стали размагничивающее действие реакции якоря больше, чем намагничивающее, так что в целом *реакция якоря приводит к уменьшению магнитного потока машины*. Напомним из курсов физики и электротехники, что свойство насыщения ферромагнитного материала заключается в том, что с ростом внешнего магнитного поля магнитная индукция внутри ферромагнетика растет все медленнее и медленнее. Ферромагнитный материал становится насыщенным, когда все домены (области самопроизвольной намагниченности) выстраиваются в направлении внешнего магнитного поля, и дальнейшее намагничивание становится невозможным.

В курсе электротехники рассматривается величина, называемая *магнитодвижущей силой (МДС)*, или *намагничивающей силой (НС)*. МДС обозначается  $F$  и характеризует свойство тока возбуждать

магнитное поле. Если по катушке, имеющей  $w$  витков, протекает ток  $I$ , то МДС катушки  $F = Iw$ .

МДС — векторная величина. Вектор МДС главных полюсов  $F_{\text{в}}$  направлен по оси полюсов от северного полюса к южному (в ту же сторону, что и средний вектор магнитной индукции). В индексе символа  $F_{\text{в}}$  буква «в» означает *обмотку возбуждения* магнитного поля машины (обмотку полюсов). Буквой «d» на рис. 1.12, а обозначена продольная ось машины, т. е. ось полюсов.

На рис. 1.12, а указано также направление вектора МДС якоря  $F_{\text{я}}$ . Оно определяется направлением линий магнитной индукции поля якоря внутри якоря. Вектор  $F_{\text{я}}$  расположен вдоль поперечной оси  $q$ , поэтому поле якоря в рассматриваемых условиях является *поперечным*.

Из-за наличия магнитного поля якоря вектор *результатирующей МДС генератора* поворачивается относительно МДС полюсов в *направлении вращения* якоря. В ту же сторону смещается нейтраль машины — плоскость, на которой индуцируемая ЭДС равна нулю. На рис. 1.12, б показана нейтраль при холостом ходе — *геометрическая нейтраль* (г. н.), а также нейтраль при рабочем режиме генератора — *физическая нейтраль* (ф. н.), смещенная относительно геометрической нейтрали на угол  $\alpha$ . Величина смещения физической нейтрали относительно геометрической зависит от величины тока якоря. Обычно говорят о смещении при номинальном рабочем режиме (при номинальном токе якоря).

Когда щетка замыкает накоротко некоторую секцию обмотки якоря, эта секция должна располагаться вблизи нейтрали машины. Теперь мы можем уточнить, что из-за реакции якоря короткозамкнутая секция должна находиться в зоне физической нейтрали; в противном случае будет иметь место значительное искрение под щетками. Одной из мер, предпринимаемых для выполнения указанного условия, является *сдвиг щеток генератора в направлении вращения якоря* на угол  $\alpha$ .

Для компенсации поля якоря применяют также *компенсационную обмотку*, которую укладывают в пазы на поверхности полюсных наконечников и соединяют последовательно с якорем так, чтобы направление тока в ее проводниках было противоположно направлению тока в проводниках якоря.

**Реакция якоря в двигателе.** Холостой ход двигателя — это режим его работы без механической нагрузки на валу. Ток обмотки якоря в этом режиме значительно меньше тока при номинальной нагрузке, хотя и не равен нулю. Поэтому магнитное поле двигателя на холостом ходу определяется, как и поле генератора, потоком его полюсов.

С увеличением механической нагрузки увеличивается ток якоря двигателя (соответствующие процессы рассмотрены в подразд. 3.3, 3.4) и усиливается влияние магнитного поля якоря на результирующее поле машины. В целом реакция якоря приводит к ослаблению магнитного потока двигателя, что объясняется явлением насыщения стали, как и в генераторе.

Пусть ток якоря и ток обмотки возбуждения двигателя имеют направления, указанные на рис. 1.12 (в двигателе оба эти тока вызваны источником питания постоянного напряжения). Сила Ампера, действующая на верхний проводник, направлена согласно правилу левой руки влево; сила, действующая на нижний проводник, направлена вправо. Поэтому вращение якоря двигателя будет происходить против часовой стрелки, а не по часовой стрелке, как указано для генератора. Конфигурации полей якоря и полюсов будут в рассматриваемом случае теми же, что и у генератора, и картина результирующего поля будет соответствовать рис. 1.12, б. Однако теперь правый край северного полюсного наконечника будет набегающим, а левый — сбегающим (для южного полюсного наконечника наоборот).

Отсюда ясно, что смещение физической нейтрали в двигателе, в отличие от генератора, происходит *против направления вращения якоря*. Поэтому сдвиг щеток в двигателе необходимо делать против направления вращения. Если же машина постоянного тока используется как в режиме двигателя, так и в режиме генератора, то сдвиг щеток применять нельзя. В этом случае для компенсации реакции якоря следует использовать компенсационную обмотку.

## 1.7. КОММУТАЦИЯ В МАШИНЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

*Коммутацией* называется процесс переключения секций обмотки якоря, переходящих из одной параллельной ветви в другую, а также совокупность явлений, происходящих при этом. Переключаемая секция замкнута щеткой накоротко и находится в это время вблизи геометрической нейтрали (сдвиг щеток не рассматриваем). ЭДС, наводимая в этой секции полем полюсов, близка к нулю.

**Прямолинейная коммутация.** Рассмотрим секцию петлевой обмотки якоря генератора, лежащую в пазах П6 и П3 (см. рис. 1.8, а). На рис. 1.13 эта секция изображена отдельно. Первоначально предположим, что якорь вращается очень медленно (период коммутации  $T_{\text{ком}}$  стремится к бесконечности). Это предположение позволит не учитывать при первоначальном рассмотрении возникновение

ЭДС самоиндукции при изменении тока в рассматриваемой секции. Будем считать, что ширина щетки равна ширине коллекторной пластины.

В начальный момент времени ( $t = 0$ ) отрицательная щетка контактирует только с коллекторной пластиной 1 (рис. 1.13, а). С этой пластиной соединены конец рассматриваемой секции (эта секция выделена более жирной линией) и начало следующей секции. Пластина 1 является узлом, в который втекает снизу ток якоря  $I_{\text{я}}$  и вытекают два одинаковых тока секций, равных  $0,5I_{\text{я}}$ . (Ток рассматриваемой секции обозначен  $i_c$ ).

Ток рассматриваемой секции доходит до коллекторной пластины 6, которая не является узлом, и далее течет по другой секции, соединенной последовательно с рассматриваемой.

Описанное распределение токов имеет место только в данный момент времени. Якорь вращается, и щетка входит в контакт с коллекторной пластиной 6 (см. рис. 1.13, б). Таким образом щетка замыкает собой начало и конец рассматриваемой секции. При этом с течением времени увеличивается площадь контакта щетки с пластиной 6 и уменьшается площадь контакта с пластиной 1. Ток якоря  $I_{\text{я}}$  разветвляется: часть этого тока приходится на пластину 1, и часть — на пластину 6. Распределение тока якоря зависит от отношения площадей контакта со щеткой. Например, в момент времени  $t = 0,2T_{\text{ком}}$  через пластину 1 проходит ток  $0,8I_{\text{я}}$ , а через пластину 6 — ток  $0,2I_{\text{я}}$ .

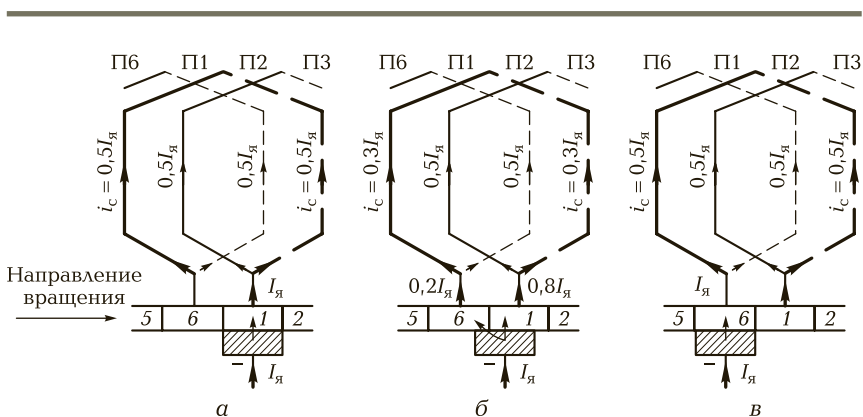


Рис. 1.13. Распределение тока якоря при коммутации:

а — в момент времени  $t = 0$ ; б — в момент времени  $t = 0,2T_{\text{ком}}$ ; в — в момент времени  $t = T_{\text{ком}}$

Будем считать токи в параллельных ветвях неизменными (это выполняется при большом числе коллекторных пластин) и равными  $0,5I_{я}$  (это справедливо для случая двух параллельных ветвей). В таком случае по секциям, соединенным через коллекторные пластины с рассматриваемой секцией, текут токи  $0,5I_{я}$ . Значит, ток коллекторной пластины  $1$  ( $0,8I_{я}$ ) делится на ток параллельной ветви  $0,5I_{я}$  и ток рассматриваемой секции  $i_c = 0,8I_{я} - 0,5I_{я} = 0,3I_{я}$ .

Ток рассматриваемой секции течет к коллекторной пластине  $6$ . Но, как было выяснено ранее, от этой пластины в якорь втекает ток  $0,2I_{я}$ . Ток секции  $0,3I_{я}$  и ток пластины  $0,2I_{я}$ , соединяясь вместе, дают ток параллельной ветви  $0,5I_{я}$ .

В момент времени  $t = 0,5T_{ком}$  на коллекторные пластины  $1$  и  $6$  приходятся одинаковые токи  $0,5I_{я}$ . Токи параллельных ветвей также равны  $0,5I_{я}$ , и по рассматриваемой секции ток не течет совсем:  $i_c = 0$ . Рассматриваемая секция находится в этот момент в плоскости геометрической нейтрали. (Распределение токов в этот момент времени на рис. 1.13 не показано.)

При дальнейшем вращении якоря ток пластины  $1$  становится меньше тока пластины  $6$ , и в момент завершения коммутации  $t = T_{ком}$  (рис. 1.13, *в*) коллекторная пластина  $6$  оказывается в тех же условиях, что и пластина  $1$  в начальный момент времени.

Зависимость тока рассматриваемой секции от времени в пределах периода коммутации показана на рис. 1.14, *а* штриховой линией. Значение тока секции изменяется по линейному закону, проходя через нуль в момент времени, равный половине периода коммутации. Такая коммутация называется прямолинейной.

**Замедленная коммутация.** В действительности период коммутации весьма мал, и изменение тока секции  $i_c$  происходит очень быстро.

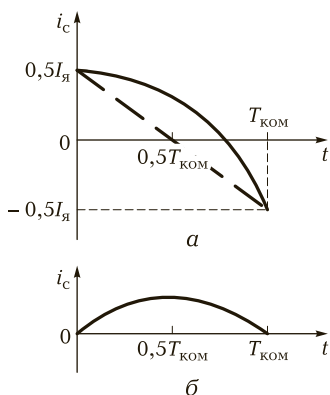


Рис. 1.14. Прямолинейная и замедленная коммутация:

*а* — график изменения тока коммутируемой секции; *б* — график изменения добавочного тока при замедленной коммутации



Известно, что изменение тока в цепи приводит к возникновению в ней ЭДС самоиндукции, которая препятствует изменению тока. Итак, в секции, замкнутой щеткой накоротко, возникает ЭДС  $e_s$ , выражаемая по закону электромагнитной индукции для самоиндукции:

$$e_s = -L_c \frac{di_c}{dt}, \quad (1.14)$$

где  $L_c$  — индуктивность секции.

В случае линейной зависимости тока секции от времени скорость изменения тока, т. е. производная тока по времени, является постоянной величиной. Поэтому ЭДС самоиндукции, возникающую в секции, можно считать также постоянной величиной.

Ток рассматриваемой секции уменьшается в процессе коммутации от значения  $0,5I_{я}$  до значения  $-0,5I_{я}$ . ЭДС самоиндукции, препятствуя уменьшению тока, *сонаправлена с током секции*. В этом случае реальный ток секции проходит через нулевое значение позже, чем при прямолинейной коммутации (см. рис. 1.14, а), поэтому реальная коммутация является *замедленной*.

Ток рассматриваемой секции  $i_c'$  при замедленной коммутации можно представить в виде суммы тока секции  $i_c$  при прямолинейной коммутации и добавочного тока секции  $i_s$ , обусловленного ЭДС самоиндукции.

В замкнутую цепь, в которой наводится ЭДС  $e_s$  и течет добавочный ток  $i_s$ , входят: активные стороны рассматриваемой секции, лежащие в пазах ПЗ и П6 (см. рис. 1.13, б), коллекторная пластина б, переходный контакт между пластиной б и щеткой, сама щетка, переходный контакт между щеткой и коллекторной пластиной 1, пластина 1. Переходные контакты обладают значительно большим сопротивлением, чем сопротивления прочих компонентов этой цепи. Поэтому, обозначив сопротивления соответствующих контактов  $r_6$  и  $r_1$ , мы можем следующим образом выразить добавочный ток, воспользовавшись законом Ома для замкнутой цепи:

$$i_s = \frac{e_s}{r_6 + r_1},$$

где учтено, что в рассматриваемой цепи переходные контакты включены последовательно.

Обозначим  $r_{пер}$  сопротивление переходного контакта между щеткой и коллекторной пластиной в момент времени  $t = 0$  (см. рис. 1.13, а), когда щетка контактирует только с одной пластиной 1. Тогда в момент времени  $t = 0,5T_{ком}$  сопротивление между щеткой и той же коллекторной пластиной будет в 2 раза больше ( $2r_{пер}$ ), поскольку

площадь перехода уменьшается к этому моменту вдвое. В тот же момент времени щетка контактирует также с половиной коллекторной пластины  $b$ . Учитывая, что в цепи, по которой течет ток  $i_s$ , переходные контакты соединены последовательно, имеем для момента времени  $t = 0,5T_{\text{ком}}$ :

$$r_6 + r_1 = 4r_{\text{пер}}; \quad i_s = \frac{e_s}{4r_{\text{пер}}}.$$

Можно показать, что в другие моменты времени суммарное сопротивление переходных контактов будет больше, а добавочный ток меньше. В частности, в моменты времени  $t = 0$  и  $t = T_{\text{ком}}$  суммарное сопротивление  $(r_6 + r_1)$  стремится к бесконечности (щетка контактирует только с одной из коллекторных пластин, а второй переход разомкнут). Поэтому добавочный ток  $i_s$  в эти моменты времени равен нулю. Этому соответствует характер изменения добавочного тока, показанный на рис. 1.14, б.

**Последствия замедленной коммутации.** Замедленная коммутация приводит к увеличенному значению плотности тока на сбегаящем крае щетки и поэтому к излишнему нагреву щетки.

Но главное неблагоприятное последствие замедленной коммутации заключается в возникновении *искрения* между коллектором и сбегаящим краем щетки. Запасенная секцией энергия магнитного поля

$$W_m = \frac{L_c i_s^2}{2},$$

где  $L_c$  — индуктивность секции, выделяется в виде электрической дуги при размыкании контакта между щеткой и коллекторной пластиной.

Отдельные дуги, сливаясь в ионизированном пространстве вокруг коллектора, могут образовать одну мощную дугу — *круговой огонь*, который вызывает серьезную аварию.

## 1.8. СПОСОБЫ УЛУЧШЕНИЯ КОММУТАЦИИ

Меры по улучшению коммутации направлены на уменьшение добавочного тока  $i_s$ .

**Добавочные полюсы.** Для того чтобы скомпенсировать ЭДС самоиндукции, возникающую в коммутируемой секции, на геометрической нейтрали машины постоянного тока устанавливают дополнительные (дополнительные) полюсы. Обмотку добавочных по-

люсов последовательно соединяют с обмоткой якоря (через щетки).

На рис. 1.15 показаны главные (N и S) и добавочные (n и s) полюсы генератора постоянного тока, а также активные стороны секций якоря. Обозначено направление ЭДС, индуцируемой главными полюсами в каждой активной стороне обмотки якоря. Две коммутируемые секции находятся вблизи геометрической нейтрали (в пазах ПЗ и П6). Одна из этих секций соединена с коллекторными пластинами 1 и 6, а вторая — с коллекторными пластинами 3 и 4 (см. также рис. 1.8, а, на котором показаны лобовые соединения). Направления электродвижущих сил, индуцируемых в этих секциях главными полюсами, показаны на рис. 1.15 более тонкими крестиками и более мелкими точками, что отображает тот факт, что вблизи нейтрали ЭДС малы.

При наличии нагрузки  $R$  направления тока в секциях совпадают с направлениями ЭДС, индуцируемыми главными полюсами. В коммутируемых секциях ток уменьшается, и в соответствии со сказанным ранее возникает ЭДС самоиндукции  $e_{si}$ , поддерживающая уменьшающийся ток и являющаяся причиной замедленной коммутации.

Если на статоре генератора установить добавочные полюсы, по обмотке которых будет течь ток якоря, то эти полюсы будут наводить в коммутируемой секции дополнительную ЭДС  $e_{\Delta}$ . Эта ЭДС

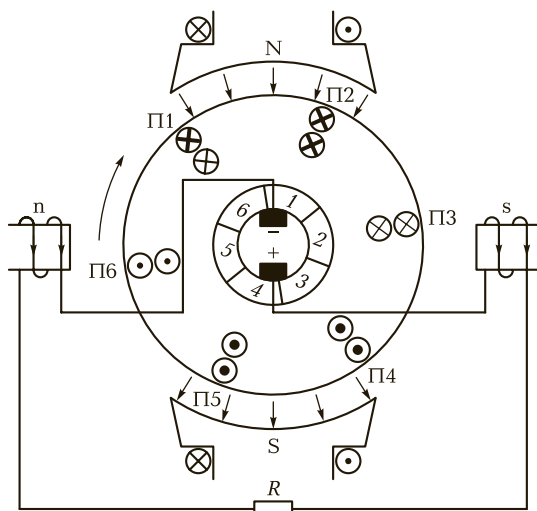


Рис. 1.15. Генератор постоянного тока с добавочными полюсами

должна быть направлена противоположно ЭДС самоиндукции  $e_s$ , чтобы скомпенсировать последнюю. В генераторе данное условие будет выполнено, если после главного северного полюса будет установлен (по ходу вращения якоря) добавочный южный, а после главного южного полюса — добавочный северный. Таким образом, последовательность полюсов генератора должна быть такова:  $NsSn$ . Если число пар главных полюсов  $p$  более одного, то указанная последовательность полюсов будет продолжена. В маломощных машинах число добавочных полюсов может быть в 2 раза меньше числа главных полюсов.

Что касается двигателя постоянного тока, то чередование полюсов по ходу вращения его якоря иное:  $NnSs$ . В частности, рис. 1.15 будет иллюстрировать правильное чередование полюсов двигателя, если заменить нагрузку  $R$  на источник постоянного напряжения и изменить направление вращения якоря на противоположное (действительно, если считать, что крестиками и точками указаны направления токов в активных сторонах якоря, то при данной полярности главных полюсов правило левой руки покажет вращение якоря двигателя против часовой стрелки).

Поскольку ЭДС самоиндукции  $e_s$  пропорциональна току якоря, то для ее автоматической компенсации при различных нагрузках необходимо, чтобы добавочные полюсы были не насыщены. Это достигается увеличенными воздушными зазорами под добавочными полюсами.

**Сдвиг щеток.** Ранее рассматривался сдвиг щеток с геометрической нейтрали на физическую с целью уменьшения реакции якоря (см. подразд. 1.6). Сдвиг щеток применяется также для улучшения условий коммутации. И в том, и в другом случае предполагается, что в машине не установлены добавочные полюсы.

Сдвиг щеток обеспечивает получение ЭДС, компенсирующей ЭДС самоиндукции  $e_s$ . Таким образом, решается та же задача, что и при установке добавочных полюсов. Для создания компенсирующей ЭДС щетки должны быть смещены относительно геометрической нейтрали на угол, превышающий угол между физической и геометрической нейтралью. В этом случае коммутация секций происходит в области, где главными полюсами в активных сторонах наводится ЭДС, противоположная по направлению той ЭДС, которая наводилась в этих сторонах до пересечения физической нейтрали.

Итак, если при использовании добавочных полюсов электродвижущая сила самоиндукции компенсируется электродвижущей силой добавочных полюсов, то при сдвиге щеток компенсирующей является ЭДС, наводимая главными полюсами.

В генераторе сдвиг щеток необходимо производить в направлении вращения ротора, а в двигателе — против направления вращения. Угол сдвига устанавливают на глаз: щетки смещают до прекращения искрения при определенном значении тока якоря.

Один из недостатков рассмотренного способа улучшения коммутации состоит в том, что компенсация ЭДС самоиндукции имеет место только для одного значения тока якоря. Кроме того, данный способ нельзя применять у машин, работающих с изменением направления вращения.

**Увеличение сопротивления коммутируемой секции.** При увеличении сопротивления коммутируемой секции уменьшается добавочный ток  $i_s$ . В сопротивление секции входит сопротивление ее активных проводов и лобовых соединений; сопротивление проводов, соединяющих секцию с коллекторными пластинами; переходное сопротивление между щетками и коллекторными пластинами, а также сопротивление щетки. Увеличение сопротивления коммутируемой секции достигается чаще всего за счет переходного сопротивления и сопротивления щеток. Для этого в машинах постоянного тока применяют щетки, обладающие повышенным значением переходного сопротивления. В машинах обычного исполнения применяют графитные щетки, в низковольтных машинах — медно-графитные и бронзографитные, в машинах с тяжелым режимом работы — угольно-графитные и электрографитные (*электрографит*, или искусственный графит, является разновидностью углерода; обычно он готовится в электропечи путем нагрева смеси тонкоизмельченного нефтяного кокса и углеродистых связующих до температуры около 3 000 °С).

**Уменьшение ЭДС самоиндукции.** Для снижения значения  $e_s$  в машинах без добавочных полюсов стремятся увеличить число секций обмотки якоря, чтобы уменьшить число витков в каждой из них, потому что в этом случае уменьшится индуктивность секций. У машин большой и средней мощности число витков секции обычно равно единице.

С той же целью снижают номинальную частоту вращения. При этом уменьшается скорость пересечения активными сторонами обмотки силовых линий магнитного поля.

Используются менее глубокие, но более широкие открытые пазы якоря. За счет этого увеличивается магнитное сопротивление для потоков рассеяния, созданных коммутируемыми секциями.

**Примечания.**

*Поток рассеяния* — это часть магнитного потока машины, которая замыкается между полюсами, минуя якорь.

*Магнитное сопротивление* однородного участка магнитной цепи вычисляется по формуле  $R_m = l/(\mu\mu_0S)$ , где  $l$  и  $S$  — длина и поперечное сечение участка магнитной цепи соответственно;  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость материала цепи;  $\mu_0$  — магнитная постоянная.

Таким образом, у образца ферромагнитного материала, характеризующегося высокой магнитной проницаемостью, магнитное сопротивление значительно меньше, чем у образца тех же размеров, выполненного из немагнитного материала. Чем меньшее магнитное сопротивление имеет магнитная цепь, тем больший магнитный поток устанавливается в ней при данном токе в обмотке.

Для снижения значения  $e_s$  применяются также обмотки с укороченным шагом  $y_1$  (см. рис. 1.8, б, рис. 1.10). Часть сторон коммутируемых секций, которые при полном шаге располагаются в одном пазу, перемещаются при этом в соседние пазы, что приводит к уменьшению магнитного потока между коммутируемыми секциями.

Устанавливают более широкие щетки. Эта мера приводит к увеличению периода коммутации секции и, значит, к уменьшению скорости изменения тока в ней. Однако более широкая щетка перекрывает одновременно большее число коллекторных пластин, и тогда одновременно коммутируется большее число секций, что вызывает повышение ЭДС взаимной индукции. Целесообразно использовать щетки шириной в два-три коллекторных деления.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните принцип работы электромашинного генератора на примере проводника, перемещаемого в магнитном поле.
2. Какова роль коллектора в генераторе постоянного тока? На что влияет увеличение числа коллекторных пластин?
3. Каково назначение обмоток статора и якоря машины постоянного тока?
4. Что означает термин «шихтованный»? С какой целью сердечники полюсов и якоря выполняются шихтованными?
5. Что такое элементарный паз якоря машины постоянного тока? Как связаны между собой число элементарных пазов, число секций обмотки якоря и число коллекторных пластин?
6. Какова отличительная особенность простой петлевой обмотки? Чему равно число параллельных ветвей такой обмотки?
7. С какой целью выполняют сложную петлевую обмотку?
8. С какой целью выполняют уравнивательные соединения первого и второго рода в обмотке якоря?

9. Каковы отличительные особенности простой и сложной волновых обмоток? Как определяется число параллельных ветвей таких обмоток?
10. Каковы области применения обмоток различных типов? Каково преимущество обмотки смешанного типа?
11. В чем состоит явление реакции якоря в машине постоянного тока? Каковы особенности реакции якоря в двигателе и генераторе?
12. Что называется коммутацией в машине постоянного тока? Каковы причины и последствия замедленной коммутации?
13. Перечислите и охарактеризуйте способы улучшения коммутации.

## ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 2.1. КПД И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ДИАГРАММА ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

**КПД генератора постоянного тока.** Электромашинный (электро-механический) генератор преобразует механическую энергию в электрическую. В процессе этого преобразования происходят потери энергии, так что *полезная* мощность  $P_2$ , которую генератор отдает во внешнюю цепь, всегда меньше *потребляемой* механической мощности (мощности на валу)  $P_1$ . Обозначим сумму всех потерь мощности  $\sum P$ . Тогда можем записать:

$$P_1 = P_2 + \sum P. \quad (2.1)$$

*Коэффициентом полезного действия* (КПД) любой машины или механизма называется отношение полезной мощности к потребляемой. Полезная мощность генератора постоянного тока равна произведению напряжения  $U$  на зажимах генератора и тока  $I$ , отдаваемого в нагрузку:  $P_2 = UI$ . Тогда КПД генератора

$$\eta_r = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum P} = \frac{UI}{UI + \sum P}. \quad (2.2)$$

Преобразуем выражение (2.2) к другому виду, для чего прибавим к числителю и вычтем из него величину  $\sum P$ :

$$\eta_r = \frac{UI + \sum P - \sum P}{UI + \sum P} = 1 - \frac{\sum P}{UI + \sum P} = 1 - \frac{\sum P}{P_1}. \quad (2.3)$$

Таким образом, КПД генератора меньше единицы на величину, показывающую, какую долю от потребляемой мощности составляют потери.

Машины постоянного тока мощностью порядка 10 кВт имеют КПД около 0,85 (85%), а машины мощностью порядка 1 000 кВт — около 0,95 (95%).



### Энергетическая диаграмма генератора постоянного тока.

На рис. 2.1 условно изображены потери потребляемой мощности в процессе ее преобразования в полезную мощность.

Механическая мощность  $P_1$ , потребляемая генератором постоянного тока, расходуется на покрытие следующих потерь:

- механические потери  $P_{\text{мех.п}}$  (трение в подшипниках; трение щеток о коллектор; вентиляционные потери, которые обусловлены трением частей машины о воздух и другими процессами, связанными с вентиляцией машины);
- потери в стали (в магнитопроводе)  $P_c$ , включающие в себя потери на гистерезис и вихревые токи, вызванные перемагничиванием стали статора и якоря.

Оставшаяся часть механической мощности  $P_1$  преобразуется в *электромагнитную мощность* (см. подразд. 1.1):

$$P_{\text{эм}} = P_1 - (P_{\text{мех.п}} + P_c).$$

Согласно уравнению (1.5) электромагнитная мощность определяется произведением ЭДС генератора на ток якоря:  $P_{\text{эм}} = EI_{\text{я}}$ . Отметим, что ток якоря  $I_{\text{я}}$  равен току нагрузки  $I$ , если основной магнитный поток генератора создается постоянным магнитом либо применяется независимое возбуждение генератора (см. далее подразд. 2.3).

Полезная мощность  $P_2 = UI_{\text{я}}$ , отдаваемая генератором в сеть, меньше электромагнитной мощности на величину электрических потерь  $P_{\text{я}}$  в якоре, т. е. в обмотке якоря  $P_{\text{об}}$  и в щеточных контактах  $P_{\text{щ}}$ :  $P_{\text{я}} = P_{\text{об}} + P_{\text{щ}}$ . Таким образом,

$$P_2 = P_{\text{эм}} - (P_{\text{об}} + P_{\text{щ}}) = P_{\text{эм}} - P_{\text{я}}.$$

Перепишем последнее уравнение с учетом выражений полезной и электромагнитной мощностей:

$$UI_{\text{я}} = EI_{\text{я}} - I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}},$$

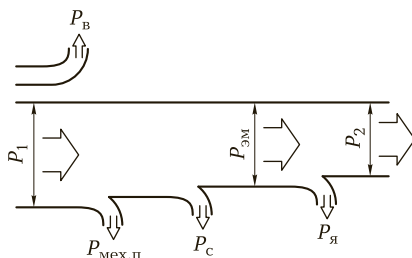


Рис. 2.1. Энергетическая диаграмма генератора постоянного тока независимого возбуждения

где мощность потерь в якоре представлена согласно закону Джоуля—Ленца, причем  $R_{я}$  — общее сопротивление якоря.

Из данного выражения следует уравнение генератора:

$$E = U + I_{я}R_{я}, \quad (2.4)$$

которое согласуется с известным выводом электротехники о том, что ЭДС источника больше напряжения на его зажимах на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника.

Мощность  $P_{в}$ , необходимая для покрытия потерь в цепи возбуждения (в цепи обмотки статора), показана на рис. 2.1 обособленно. Это справедливо для генератора независимого возбуждения, где мощность  $P_{в}$  не является частью подводимой мощности  $P_1$ . На энергетической диаграмме генератора с самовозбуждением (см. подразд. 2.4, 2.5) мощность, расходуемую в цепи возбуждения, следует изобразить рядом с мощностью  $P_{я}$ , т. е. на отрезке между  $P_{эм}$  и  $P_2$ , поскольку мощность  $P_{в}$  в таком генераторе является частью электромагнитной мощности.

Следует отметить, что энергетическая диаграмма (см. рис. 2.1) является упрощенной, поскольку в ней учтены только основные потери генератора. Кроме них имеют место также добавочные, или дополнительные, потери.

Добавочные потери вызваны, в частности, зубчатым строением сердечника якоря, т. е. наличием в нем пазов и зубцов (промежутков между пазами). При вращении якоря магнитная индукция в каждой точке поверхности полюсного наконечника пульсирует. Магнитная индукция максимальна, когда против рассматриваемой точки находится зубец якоря, и минимальна, когда против этой точки находится паз якоря.

Вследствие пульсации магнитного поля в полюсных наконечниках индуцируются вихревые токи, потребляющие часть энергии генератора. Величина данного вида добавочных потерь зависит от величины пульсаций магнитной индукции (пульсация больше в случае открытых пазов якоря), от частоты пульсаций (она зависит от числа пазов и частоты вращения якоря), от толщины листов стали, из которых набраны полюсы, и от изоляционных свойств оксидной пленки между листами.

К добавочным потерям относятся также потери, которые возникают в проволочных бандажах и в других деталях при их вращении в магнитном поле полюсов.

Указанные два вида добавочных потерь существуют во вращающейся машине даже при отсутствии нагрузки, поэтому они являются *потерями холостого хода*.

При нагрузке машины возникают добавочные потери, связанные с искажением магнитного поля в воздушном зазоре под влиянием реакции якоря (см. подразд. 1.6), а также обусловленные возникновением добавочного тока при коммутации (см. подразд. 1.7).

## 2.2. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Основываясь на рассуждениях, приведенных при раскрытии принципа работы электромашинного генератора (см. подразд. 1.1), выясним, от каких факторов зависит ЭДС, индуцируемая в якоре машины постоянного тока. Результат, к которому мы придем, будет важен при дальнейшем изучении электрических машин.

Формула (1.1) определяет ЭДС, возникающую в проводнике с активной длиной  $l$ , перемещаемом под действием внешней силы со скоростью  $v$  перпендикулярно силовым линиям магнитного поля с индукцией  $B$ . В условиях электрической машины индукция не остается постоянной по окружности статора. Наибольшее значение она имеет под серединой полюсного наконечника, а на геометрической нейтральной индукция равна нулю (если не принимать в расчет влияние реакции якоря). Поэтому удобно пользоваться средней магнитной индукцией  $B_{cp}$  и средней ЭДС  $E_{cp}$ , индуцируемой в отдельном активном проводнике обмотки якоря. Тогда вместо (1.1) запишем

$$E_{cp} = B_{cp}lv. \quad (2.5)$$

При рассмотрении принципов построения обмоток якоря учитывалось, что ЭДС машины является суммой ЭДС, наводимых во всех последовательно соединенных активных сторонах одной параллельной ветви (см. уравнение (1.11)). В общем случае, когда каждая секция обмотки состоит из нескольких последовательно соединенных витков, данное утверждение можно уточнить: ЭДС машины представляет собой сумму ЭДС, наводимых во всех последовательно соединенных активных проводниках одной параллельной ветви.

Если  $N$  — общее число активных проводников обмотки якоря, то на одну параллельную ветвь приходится  $N/(2a)$  активных проводников, где буквой « $a$ » обозначено число пар параллельных ветвей обмотки. Тогда ЭДС машины будет выражена следующим образом:

$$E = E_{cp} \frac{N}{2a} = B_{cp}lv \frac{N}{2a},$$

где сумма ЭДС активных проводников заменена произведением средней ЭДС на число проводников параллельной ветви.

Линейная скорость движения активного проводника, которую он имеет при вращении якоря («окружная» скорость)  $v = L_{\text{окр}}/T_{\text{вр}}$ , где  $L_{\text{окр}}$  — длина окружности якоря;  $T_{\text{вр}}$  — период вращения. Над якорем расположены  $2p$  полюса, тогда длину окружности якоря можно выразить через полюсное деление  $\tau$  таким образом:  $L_{\text{окр}} = 2p\tau$ . Для линейной скорости проводника имеем:  $v = 2p\tau/T_{\text{вр}}$ .

Период вращения  $T_{\text{вр}}$ , измеряемый в секундах, есть величина, обратная частоте вращения  $f_{\text{вр}}$ , измеряемой в оборотах в секунду:  $T_{\text{вр}} = 1/f_{\text{вр}}$  (в двухполюсной машине частота вращения  $f_{\text{вр}}$  совпадает с частотой  $f$ , индуцируемой ЭДС; в машине, имеющей  $2p$  полюса,  $f = pf_{\text{вр}}$ ).

Как указано в подразд. 1.1, частоту вращения якоря принято измерять в оборотах в минуту и обозначать  $n$ . Понятно, что  $f_{\text{вр}} = n/60$  и  $T_{\text{вр}} = 60/n$ . Тогда выражение скорости может быть записано следующим образом:

$$v = \frac{2p\tau n}{60}.$$

Подставим полученное значение скорости в уравнение ЭДС машины и получим

$$E = B_{\text{ср}} l \frac{2p\tau n}{60} \frac{N}{2a}.$$

Заметим, что  $lt$  выражает площадь полюсного деления, тогда произведение  $B_{\text{ср}}lt$  представляет собой магнитный поток  $\Phi$  одного полюса (напомним, что магнитный поток через площадку площадью  $S$  в случае, если линии магнитной индукции входят в эту площадку под прямым углом, равен произведению магнитной индукции  $B$  в пределах площадки на площадь:  $\Phi = BS$ ).

Упростим выражение ЭДС с учетом изложенного ранее:

$$E = \Phi \frac{pnN}{60a}.$$

Величины  $p$ ,  $N$ ,  $a$  зависят от конструкции машины. Объединим эти величины вместе с числовым коэффициентом, введя *конструктивную постоянную*  $c_e$ :

$$c_e = \frac{pN}{60a}. \quad (2.6)$$

Получим окончательное выражение электродвижущей силы машины постоянного тока

$$E = c_e \Phi \omega. \quad (2.7)$$

Таким образом, ЭДС машины пропорциональна магнитному потоку полюса и частоте вращения якоря, при этом зависимость ЭДС от числа пар полюсов, от числа проводников обмотки и от числа пар параллельных ветвей содержится в конструктивной постоянной машины.

Важно отметить, что полученное выражение ЭДС справедливо не только для генератора, но и для двигателя, в котором ЭДС противоположна току якоря (см. подразд. 3.1).

### 2.3. ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

**Схема включения генератора независимого возбуждения.** В генераторе независимого возбуждения обмотка возбуждения (обмотка главных полюсов, создающая основной магнитный поток) питается от независимого источника постоянного напряжения. Данный способ возбуждения применяют в случаях, когда требуется широкое регулирование напряжения генератора. Мощность, потребляемая цепью возбуждения, составляет 1 ... 5 % от номинальной мощности, вырабатываемой генератором.

На рис. 2.2 показана схема включения генератора  $G$  в цепь нагрузки сопротивлением  $R$ . Обмотка возбуждения  $LG$  включена в цепь независимого источника напряжения  $U_B$ . В цепи возбуждения установлен регулировочный резистор  $R_{\text{рег}}$ , предназначенный для регулировки тока возбуждения  $I_B$  (в технической литературе для обо-

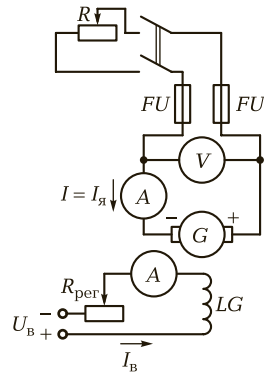


Рис. 2.2. Схема измерения характеристик генератора постоянного тока независимого возбуждения

значения тока возбуждения используется также символ  $I_f$ , в котором индекс «f» происходит от англ. *field* — поле; в данном случае подразумевается магнитное поле.) Ток нагрузки  $I$  генератора независимого возбуждения равен току якоря  $I_{я}$ . (Для обозначения тока якоря используется также символ  $I_a$ , где индекс «a» происходит от англ. *armature*, означающего якорь электрической машины.) В схеме предусмотрены приборы для измерения характеристик генератора.

**Характеристика холостого хода (ХХХ) генератора.** Эта характеристика представляет собой зависимость его ЭДС  $E$  от тока возбуждения  $I_B$  при разомкнутой цепи нагрузки и постоянной скорости вращения якоря  $n$ . Практическое значение ХХХ заключается в том, что по ее виду можно судить о степени насыщения магнитной цепи машины, поскольку ЭДС генератора пропорциональна магнитному потоку полюсов (см. формулу (2.7)). Кроме того, данная характеристика используется для построения других характеристик машины.

Если ток возбуждения изменять не только по значению, но и по направлению, а затем построить зависимость ЭДС от тока возбуждения в четырех координатных четвертях, то полученный график будет иметь вид петли (рис. 2.3). Несовпадение кривых, полученных при увеличении и уменьшении тока возбуждения, объясняется гистерезисом в магнитной системе машины, т. е. зависимостью магнитной индукции  $B$  в ферромагнитном материале не только от напряженности  $H$  магнитного поля, но и от предшествующего состояния ферромагнетика. Величина напряженности магнитного поля генератора пропорциональна току в обмотке его полюсов (напомним, что напряженность магнитного поля на осевой линии катушки в ее

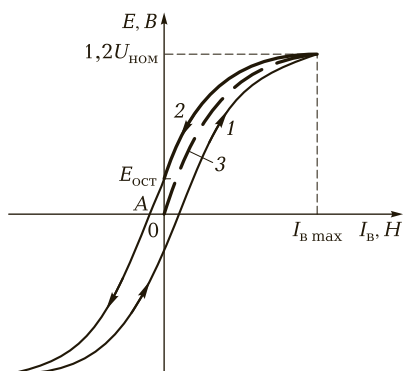


Рис. 2.3. Характеристика холостого хода генератора:

1 — восходящая ветвь; 2 — нисходящая ветвь; 3 — расчетная характеристика

центральной части  $H = Iw/l$ , где  $I$  — ток в катушке;  $w$  — число витков катушки;  $l$  — длина катушки).

Исходя из сказанного приходим к выводу, что график зависимости ЭДС  $E$  генератора от тока возбуждения  $I_v$  — это построенная в другом масштабе характеристика намагничивания магнитной цепи генератора, т. е. график зависимости индукции поля  $B$  от напряженности  $H$ .

За расчетную характеристику холостого хода принимается кривая 3, начинающаяся в начале координат и построенная в первой координатной четверти между восходящей 1 и нисходящей 2 ветвями экспериментальной характеристики. Расчетная характеристика показана на рис. 2.3 штриховой кривой 3.

Для практических целей обычно ограничиваются получением на опыте *нисходящей части характеристики*, для чего ток возбуждения  $I_v$  уменьшают от максимального значения  $I_{v\max}$  до нуля (сплошная жирная линия 2 на рис. 2.3). В качестве максимального выбирается такой ток возбуждения, при котором ЭДС генератора принимает значение, равное  $1,2U_{\text{ном}}$ , где  $U_{\text{ном}}$  — номинальное напряжение генератора. При токе возбуждения, равном нулю, ЭДС генератора нулю не равняется; она приобретает значение, составляющее 1 ... 3 % от номинального напряжения генератора  $U_{\text{ном}}$ . Эта так называемая *остаточная ЭДС*  $E_{\text{ост}}$ , которая обусловлена *остаточным магнитным полем* машины: при исчезновении внешнего магнитного поля, создаваемого током возбуждения, ферромагнитные сердечники полюсов и якоря не размагничиваются полностью (наличие остаточного магнитного поля и является причиной того, что характеристика намагничивания ферромагнетика, а также ХХХ генератора имеют вид петли).

Получив нисходящую ветвь характеристики в указанных пределах тока возбуждения, ее продолжают до пересечения с осью абсцисс в точке А, а затем передвигают параллельно самой себе вправо на расстояние АО. В результате получается кривая, практически совпадающая с расчетной характеристикой холостого хода 3.

Начальная прямолинейная часть характеристики холостого хода соответствует ненасыщенному состоянию магнитной системы генератора, когда магнитный поток полюсов растет пропорционально току возбуждения.

Дальнейшее замедление увеличения магнитного потока связано с насыщением магнитной системы. (Напомним, что при полном насыщении магнитные поля всех доменов ферромагнетика ориентированы вдоль внешнего магнитного поля. *Домены* — области самопроизвольной намагничивания.)





Используя нагрузочную характеристику и характеристику холостого хода, строят *характеристический треугольник*, который показывает влияние каждого из двух названных факторов на уменьшение напряжения на выводах генератора. Рассмотрим построение характеристического треугольника  $ABC$  (см. рис. 2.4).

Точка  $A$  нагрузочной характеристики соответствует номинальному режиму работы генератора, т. е. номинальному току нагрузки  $I_{\text{ном}}$  и номинальному напряжению  $U_{\text{ном}}$  на зажимах генератора при номинальном токе возбуждения  $I_{\text{в.ном}}$ . Если отключить нагрузку, то при том же токе возбуждения напряжение на зажимах генератора поднимется до значения, равного ЭДС генератора  $E$ . Таким образом, отрезок  $AD$  характеризует уменьшение напряжения при нагрузке.

Уменьшение напряжения, обусловленное *только падением напряжения в цепи якоря*, равно в номинальном режиме  $I_{\text{ном}}R_{\text{я}}$ , где  $R_{\text{я}}$  — сопротивление якоря, измеряемое непосредственно. От точки  $A$  отложим вертикально вверх отрезок  $AB$ , равный (в масштабе напряжения) падению напряжения  $I_{\text{ном}}R_{\text{я}}$ . Напомним, что все точки нагрузочной характеристики соответствуют одному и тому же току нагрузки, в данном случае номинальному току  $I_{\text{ном}}$ . По этой причине отрезок, характеризующий падение напряжения в цепи якоря, будет иметь одну и ту же длину для всех точек нагрузочной характеристики. В частности, отрезок  $A_1B_1$ , построенный для тока возбуждения  $I_{\text{в1}}$ , равен отрезку  $AB$ , построенному для номинального тока возбуждения. Отложив множество вертикальных отрезков, равных отрезку  $AB$ , от различных точек нагрузочной характеристики, проведем через их верхние концы кривую ЭДС, наводимой в обмотке якоря полем главных полюсов (штриховая линия на рис. 2.4). Эта кривая проходит ниже характеристики холостого хода, поскольку при ее построении не рассматривалось размагничивающее действие реакции якоря.

Из сказанного следует, что размагничивающее действие реакции якоря для разных значений тока возбуждения характеризуется вертикальными отрезками между характеристикой холостого хода и кривой ЭДС, наводимой полем главных полюсов (отрезками  $BD$  и  $B_1D_1$  на рис. 2.4).

Влияние реакции якоря можно охарактеризовать также отрезками  $BC$  и  $B_1C_1$ , измеренными в масштабе тока возбуждения. Это видно из следующего.

Проведем через точку  $B$  горизонтальную прямую. Точку пересечения этой прямой с характеристикой холостого хода обозначим  $C$  (это третья точка характеристического треугольника  $ABC$ ). Вертикальная прямая, проходящая через точку  $C$ , указывает на горизонтальной оси ток возбуждения  $I'_{\text{в.ном}}$ , при котором ЭДС генератора

равна  $E'_{\text{ном}}$ . Ток возбуждения  $I'_{\text{в.ном}}$  обеспечивает номинальное напряжение на выводах генератора при отсутствии размагничивающего действия реакции якоря. В реальной ситуации, когда реакция якоря имеет место, этот ток нужно повысить до значения  $I_{\text{в.ном}}$ . Разность токов  $I_{\text{в.ном}}$  и  $I'_{\text{в.ном}}$  обеспечивает компенсацию размагничивающего действия реакции якоря.

Характеристический треугольник  $A_1B_1C_1$ , построенный для тока возбуждения, меньшего номинального, имеет горизонтальный катет  $B_1C_1$ , меньший соответствующей стороны  $BC$  треугольника  $ABC$ . Дело в том, что при токе возбуждения  $I_{\text{в1}}$  магнитная система генератора не насыщена, и размагничивающее действие реакции якоря в этом случае меньше, чем при номинальном токе возбуждения.

Характеристический треугольник позволяет построить по характеристике холостого хода прочие характеристики генератора.

**Внешняя характеристика.** Это основная эксплуатационная характеристика генератора, показывающая изменение напряжения  $U$  на выводах машины при изменении тока нагрузки  $I$ , если при этом на цепь возбуждения не оказывают никакого воздействия (в случае генератора независимого возбуждения этому условию соответствует постоянство тока возбуждения) и если скорость вращения якоря постоянна.

Как было сказано ранее, при увеличении тока нагрузки напряжение на зажимах генератора уменьшается из-за падения напряжения в цепи якоря и размагничивающего действия реакции якоря.

Исходной точкой при снятии внешней характеристики является номинальный режим. Чтобы задать этот режим, замыкают рубильник нагрузки (см. рис. 2.2) и регулируют сопротивление нагрузки  $R$  и ток возбуждения  $I_{\text{в}}$  так, чтобы при номинальном напряжении  $U_{\text{ном}}$  на зажимах генератора ток нагрузки принял номинальное значение  $I_{\text{ном}}$ . Установленный при этом ток возбуждения является номинальным током возбуждения  $I_{\text{в.ном}}$ . После задания номинального режима генератор постепенно разгружают (увеличивают сопротивление нагрузки). Ток нагрузки при этом уменьшается, а напряжение на зажимах генератора увеличивается. В режиме холостого хода, т. е. при размыкании цепи нагрузки, напряжение генератора принимает наибольшее значение  $U_{01}$ , равное ЭДС  $E$  (рис. 2.5, а, кривая 1).

По участку внешней характеристики от холостого хода до номинального режима определяют процентное изменение напряжения  $\Delta u$  по отношению к номинальному напряжению:

$$\Delta u = \frac{U_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100. \quad (2.8)$$

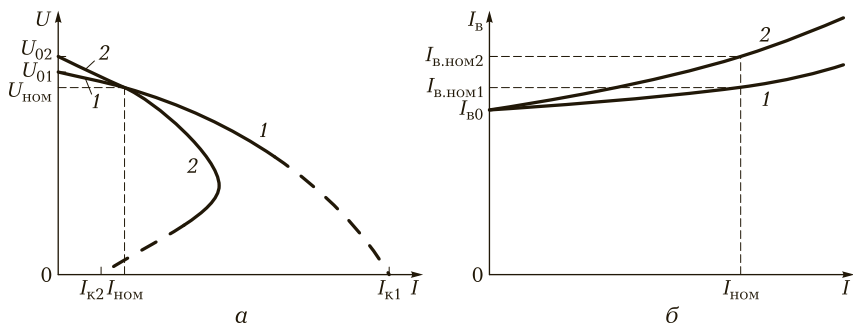


Рис. 2.5. Характеристики генераторов постоянного тока:

а — внешние; б — регулировочные; 1 — генератор независимого возбуждения; 2 — генератор параллельного возбуждения

Если начиная с номинального режима нагружать генератор (уменьшать сопротивление нагрузки), то напряжение будет уменьшаться. Внешняя характеристика пересекает горизонтальную ось (напряжение  $U$  становится равным нулю) при нулевом сопротивлении нагрузки. При этом ток во внешней цепи (ток короткого замыкания  $I_k$ ) превышает номинальный ток нагрузки  $I_{ном}$  в 5—10 раз. Режим короткого замыкания является для генератора независимого возбуждения аварийным.

При получении внешней характеристики исходным может быть также режим холостого хода. В этом случае при отсутствии нагрузки устанавливают такой ток возбуждения, чтобы напряжение на зажимах генератора было равно номинальному или превышало его.

Внешняя характеристика может быть построена с помощью характеристики холостого хода и характеристического треугольника.

**Регулировочная характеристика.** Она показывает, как нужно изменять ток возбуждения, чтобы при изменении тока нагрузки напряжение на выводах генератора оставалось неизменным и равным, чаще всего, номинальному значению  $U_{ном}$ . Таким образом, регулировочная характеристика представляет собой зависимость тока возбуждения  $I_v$  от тока нагрузки  $I$  при постоянных значениях напряжения генератора  $U$  и частоты вращения якоря  $n$ . Эта характеристика показывает, что при увеличении тока нагрузки необходимо увеличивать ток возбуждения, чтобы компенсировать уменьшение напряжения (рис. 2.5, б, кривая 1). При получении регулировочной характеристики сначала при отсоединенной нагрузке задают ток возбуждения  $I_{в0}$ , при котором

устанавливается номинальное напряжение  $U_{\text{ном}}$  на зажимах генератора. Затем замыкают цепь нагрузки и постепенно уменьшают сопротивление нагрузки, одновременно регулируя ток возбуждения, так чтобы не изменялось показание вольтметра, измеряющего напряжение на зажимах генератора (см. рис. 2.2).

Пределы регулировки тока возбуждения характеризуют отношением

$$\Delta i_{\text{в}} = \frac{I_{\text{в.ном}} - I_{\text{в0}}}{I_{\text{в.ном}}} 100. \quad (2.9)$$

Регулировочную характеристику, как и внешнюю, можно построить с использованием характеристики холостого хода и характеристического треугольника.

## 2.4. ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ. САМОВОЗБУЖДЕНИЕ

**Схема включения генератора параллельного возбуждения.** Генератор постоянного тока параллельного возбуждения отличается от генератора независимого возбуждения тем, что его обмотка возбуждения присоединяется параллельно обмотке якоря (рис. 2.6, а) и, следовательно, получает питание от якоря. Ток якоря  $I_{\text{я}}$ , ток нагрузки  $I$  и ток возбуждения  $I_{\text{в}}$  связаны между собой первым законом Кирхгофа:

$$I_{\text{я}} = I + I_{\text{в}}, \text{ или } I = I_{\text{я}} - I_{\text{в}}. \quad (2.10)$$

Очевидно, что при холостом ходе (ХХ)  $I = 0$  и ток якоря равен току возбуждения.

Параллельную обмотку возбуждения называют также *шунтовой обмоткой* (от англ. *shunt* — разветвление, параллельная цепь). Зажимы параллельной обмотки обозначают Ш<sub>1</sub> и Ш<sub>2</sub>.

**Процесс самовозбуждения.** Когда якорь генератора не вращается, ток в обмотке возбуждения отсутствует (никакой источник обмотку возбуждения не питает). Однако магнитная система невращающегося генератора полностью не размагничена; она обладает остаточным магнитным полем. Остаточное поле делает возможным процесс *самовозбуждения*, происходящий при вращении якоря.

Процесс самовозбуждения протекает следующим образом.

1. Остаточный магнитный поток индуцирует остаточную ЭДС  $E_{\text{ост}}$  в обмотке вращающегося якоря (остаточная ЭДС составляет 1 ... 3 % от номинального напряжения генератора  $U_{\text{ном}}$ ).

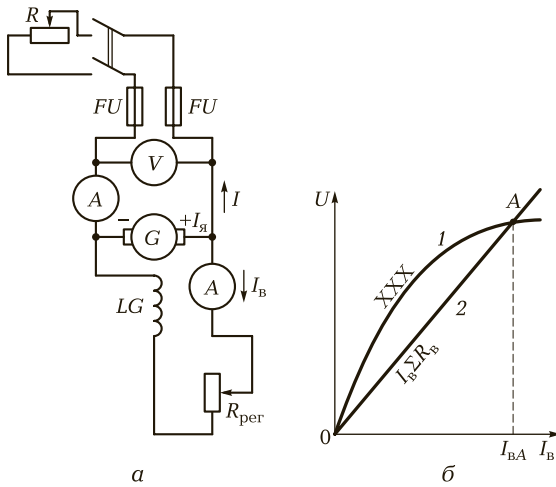


Рис. 2.6. Генератор постоянного тока параллельного возбуждения:  
 а — схема включения; б — график, поясняющий третье условие самовозбуждения

2. К якору подключена обмотка возбуждения, поэтому при действии ЭДС  $E_{ост}$  в обмотке возбуждения протекает ток  $I_B = \frac{E_{ост}}{\Sigma R_B}$ , где  $\Sigma R_B$  — суммарное сопротивление цепи возбуждения, в которое входит сопротивление обмотки возбуждения и сопротивление регуляционного реостата  $R_{пер}$ .

3. Ток  $I_B$ , протекая по обмотке возбуждения, увеличивает основной магнитный поток машины, который, в свою очередь, увеличивает ЭДС якоря.

4. Увеличение ЭДС якоря приводит к дальнейшему росту тока возбуждения и магнитного потока; напряжение на зажимах машины возрастает лавинообразно до достижения установившегося значения.

Для нормального протекания процесса самовозбуждения должны быть выполнены следующие три условия.

**Первое условие.** В машине должно существовать остаточное магнитное поле.

**Второе условие.** Обмотка возбуждения должна быть присоединена к якору таким образом, чтобы ее магнитный поток совпадал по направлению с потоком остаточного магнетизма. В случае неправильного присоединения поток остаточного магнетизма будет

направлен встречно потоку обмотки возбуждения. Тогда основной магнитный поток машины не будет возрастать, и ЭДС не будет увеличиваться.

Третье условие. Сопротивление цепи обмотки возбуждения  $\sum R_B$  должно быть меньше определенного критического значения  $R_{кр}$ .

Выясним, чем определяется это критическое значение.

Пусть направления основного и остаточного магнитного потоков одинаковы. Поскольку источником питания цепи возбуждения является сам генератор, напряжение  $U_B$  на цепи возбуждения является одновременно напряжением на зажимах якоря генератора. Оно отличается от ЭДС генератора на величину падения напряжения в цепи якоря, но при рассмотрении процессов в цепи возбуждения мы можем интерпретировать величину  $U_B$  как ЭДС идеального источника, действующего в этой цепи.

В процессе самовозбуждения, как отмечалось ранее, происходит возрастание тока возбуждения. Изменение тока катушки возбуждения сопровождается явлением самоиндукции, препятствующим мгновенному изменению тока. ЭДС самоиндукции  $e_s$ , характеризующая это явление, пропорциональна скорости изменения тока возбуждения (см. выражение (1.14)):

$$e_s = -L_B \frac{dI_B}{dt},$$

где  $L_B$  — индуктивность обмотки возбуждения.

В цепи возбуждения, при протекании по ней тока, имеет место падение напряжения  $I_B \sum R_B$  на сопротивлении этой цепи.

Согласно второму закону Кирхгофа алгебраическая сумма ЭДС, действующих в контуре, равна сумме падений напряжения на сопротивлениях контура. Тогда для цепи возбуждения можно записать

$$U_B - L_B \frac{dI_B}{dt} = I_B \sum R_B.$$

Отсюда получаем зависимость напряжения цепи возбуждения от тока возбуждения:

$$U_B = I_B \sum R_B + L_B \frac{dI_B}{dt}. \quad (2.11)$$

Пуск генератора и процесс его самовозбуждения протекают обычно при отключенной нагрузке. Поскольку напряжение  $U_B$  цепи возбуждения генератора параллельного возбуждения является одновременно напряжением  $U$  на зажимах якоря, то уравнение (2.11)

описывает характеристику ХХ, т. е. зависимость напряжения на зажимах генератора от тока возбуждения в режиме холостого хода (см. рис. 2.6, б, линия 1).

Зависимость падения напряжения на сопротивлении цепи возбуждения от тока возбуждения изображается графиком прямой пропорциональности в силу постоянства сопротивления  $\Sigma R_B$  (см. рис. 2.6, б, линия 2).

Согласно уравнению (2.11) напряжение цепи возбуждения при данном токе возбуждения больше падения напряжения на сопротивлении цепи возбуждения на величину  $L_B \frac{dI_B}{dt}$ . Таким образом, для каждого значения тока возбуждения величина  $L_B \frac{dI_B}{dt}$  изображается отрезком вертикальной прямой между линиями 1 и 2. В точке А пересечения линий 1 и 2, где длина такого отрезка становится равной нулю, ЭДС самоиндукции равна нулю, а это означает равенство нулю скорости изменения тока возбуждения  $\frac{dI_B}{dt}$ . Другими словами, при достижении точки А ток возбуждения  $I_B$  становится постоянным. Таким образом, в процессе самовозбуждения, описанном ранее, ток возбуждения растет от нуля до значения  $I_{BA}$ .

Если сопротивление цепи возбуждения увеличивать, то угол наклона прямой линии 2 будет увеличиваться. При некотором значении величины  $\Sigma R_B$  прямая 2 станет касательной к кривой 1 и будет располагаться выше этой кривой для всех значений тока возбуждения (кроме точки касания). Такое значение сопротивления  $\Sigma R_B$  является критическим  $R_{кр}$ . Если сопротивление цепи возбуждения больше критического сопротивления, то самовозбуждение невозможно. Таким образом, обосновано третье условие самовозбуждения, приведенное ранее.

**Характеристика холостого хода и нагрузочная характеристики** генератора параллельного возбуждения вполне аналогичны соответствующим характеристикам генератора независимого возбуждения (см. рис. 2.3, 2.4). Однако у генератора параллельного возбуждения эти характеристики могут быть получены только при одном направлении тока возбуждения, поскольку при другом направлении не выполняется второе условие самовозбуждения.

**Внешняя характеристика** генератора параллельного возбуждения, т. е. зависимость напряжения  $U$  на его зажимах от тока нагрузки  $I$  при отсутствии регулировки тока возбуждения более круто наклонена к горизонтальной оси по сравнению с внешней характеристикой генератора независимого возбуждения (см. рис. 2.5, а).

Факторы, влияющие на уменьшение напряжения на зажимах генератора независимого напряжения, остаются в силе и в случае генератора параллельного возбуждения. У этого последнего с уменьшением напряжения уменьшается также и ток возбуждения, так как его цепь возбуждения питается непосредственно от якоря. Уменьшение тока возбуждения ослабляет магнитный поток полюсов, что приводит к уменьшению ЭДС машины и поэтому к еще большему уменьшению напряжения.

По мере понижения напряжения, происходящего при уменьшении сопротивления нагрузки, ток возбуждения становится все меньше и меньше, и магнитный поток ослабляется (машина размагничивается). Ток нагрузки  $I$  при этом растет лишь до значения, превышающего номинальное  $I_{ном}$  в 2—2,5 раза. При дальнейшем уменьшении сопротивления нагрузки ток нагрузки уменьшается: преобладающим фактором, влияющим на изменение тока нагрузки, является при этом не уменьшение сопротивления нагрузки, а уменьшение напряжения на зажимах генератора. При снижении сопротивления нагрузки до нуля (режим короткого замыкания) цепь возбуждения перестает получать питание и ток возбуждения становится равным нулю. Ток нагрузки при этом принимает значение  $I_{к2} = E_{ост}/R_{я}$ , меньшее номинального тока. Однако при внезапном коротком замыкании машина не может размагнититься мгновенно и ток короткого замыкания достигает опасного для машины значения. На валу при этом будет действовать значительный тормозящий момент, а на коллекторе возникает сильное искрение, переходящее в круговой огонь.

**Регулировочная характеристика** — это зависимость тока возбуждения  $I_v$  от тока нагрузки  $I$  при поддерживаемых постоянных значениях напряжения генератора  $U$  и частоты вращения якоря  $n$ , имеет у генератора параллельного возбуждения вид, подобный регулировочной характеристике генератора независимого возбуждения (см. рис. 2.5, б). Естественно, что подъем характеристики, определяемый уравнением (2.9), больше у генератора параллельного возбуждения, поскольку снижение напряжения при отсутствии регулирования у такого генератора более значительно (см. рис. 2.5, а), и для поддержания напряжения на постоянном уровне при заданном токе нагрузки требуется больший ток возбуждения.

Обобщим сказанное в подразд. 2.3 и 2.4. Генератор параллельного возбуждения имеет то преимущество, что для питания его обмотки возбуждения не требуется отдельный источник. Преимуществом же генератора независимого возбуждения является возможность более широкого регулирования напряжения на зажимах.



## 2.5. ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО И СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

**Генератор последовательного возбуждения.** В генераторе будет происходить самовозбуждение магнитного тока не только при параллельном, но и при последовательном включении обмотки возбуждения (рис. 2.7, а). В этом случае ток якоря  $I_{я}$  является одновременно током нагрузки  $I$  и током возбуждения  $I_{в}$ .

Последовательную обмотку называют также *серийной* (от англ. *series* — последовательный). Зажимы последовательной обмотки обозначают  $C_1$  и  $C_2$ .

В режиме ХХ ток возбуждения генератора последовательного возбуждения равен нулю, поэтому для такого генератора нельзя построить характеристику холостого хода  $E(I_{в})$ . Регулировочная характеристика, т. е. зависимость  $I_{в}(I)$  при постоянном напряжении, очевидно, также не строится, так как ток возбуждения совпадает с током нагрузки. Для построения нагрузочной характеристики  $U(I_{в})$  нужно поддерживать постоянный ток нагрузки, что невозможно по той же причине.

Из изложенного следует, что свойства генератора последовательного возбуждения определяются только внешней характеристикой  $U(I)$ .

Замкнув рубильник цепи нагрузки и начиная уменьшать сопротивление нагрузки, мы обнаружим сначала почти линейное возрас-

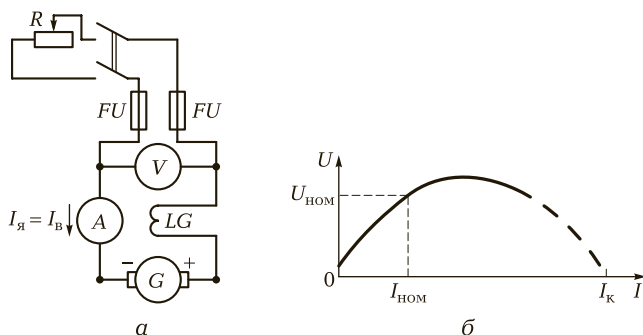


Рис. 2.7. Генератор постоянного тока последовательного возбуждения: а — схема включения; б — внешняя характеристика

тание напряжения с ростом тока нагрузки, поскольку этот ток является также током возбуждения, а магнитная система генератора при малых токах не насыщена (рис. 2.7, б). При дальнейшем увеличении тока насыщение магнитной системы увеличивается, и темп роста напряжения становится меньше. Напряжение увеличивается до некоторого максимального значения, а затем, при дальнейшем увеличении тока, начинает уменьшаться. Такое поведение внешней характеристики обуславливает, помимо насыщения стали, размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения в сопротивлениях цепи якоря, т.е. те же факторы, которые имеют место в работе генераторов двух описанных ранее систем возбуждения. При коротком замыкании (КЗ), когда напряжение на зажимах генератора равно нулю, ток приобретает значение, много большее номинального.

Ввиду того что напряжение на зажимах генератора последовательного возбуждения изменяется в значительных пределах при изменении тока нагрузки и при этом отсутствует возможность поддержания напряжения на постоянном уровне (поскольку ток возбуждения является одновременно током нагрузки), *такие генераторы на нашли практического применения*. Но особенности последовательного возбуждения используются в генераторах смешанного возбуждения.

**Генератор смешанного возбуждения** сочетает в себе свойства генераторов параллельного и последовательного возбуждения. Другое название этого типа возбуждения генераторов — *компаундное возбуждение* (от англ. compound — смешивать, соединять, составлять). Ранее мы выяснили, что при параллельном возбуждении напряжение генератора уменьшается с ростом тока нагрузки, а при последовательном — увеличивается (при нагрузке, не слишком отличающейся от номинальной). В таком случае можно использовать две рассмотренные обмотки возбуждения одновременно (рис. 2.8, а), и при этом так подобрать число витков последовательной обмотки, чтобы напряжение мало изменялось с изменением нагрузки. Например, можно добиться того, чтобы напряжение  $U_{\text{ном}}$  при номинальном токе было равно напряжению  $U_0$  при холостом ходе (рис. 2.8, б, кривая 1). При промежуточных значениях тока напряжение будет отличаться от  $U_0$ , но в существенно меньшей степени, чем при параллельном и даже независимом возбуждении.

Увеличивая число витков обмотки последовательного возбуждения (усиливая последовательную обмотку), можно получить при номинальном токе большее напряжение, чем при холостом ходе (кривая 2), скомпенсировав тем самым падение напряжения в про-

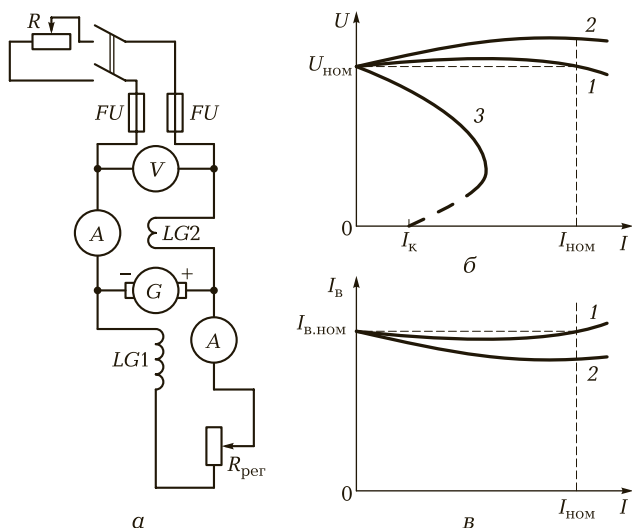


Рис. 2.8. Генератор постоянного тока смешанного возбуждения:

а — схема включения; б — внешние характеристики; в — регулировочные характеристики; 1 — нормальное возбуждение; 2 — перевозбуждение; 3 — встречное включение обмоток

водниках линии. В этом случае говорят о *первозбуждении* генератора.

Если же поменять местами точки включения последовательной обмотки возбуждения, то она будет оказывать размагничивающее действие на поле, созданное параллельной обмоткой. Внешняя характеристика будет резко падающей, а ток короткого замыкания станет малым (кривая 3). Встречное включение обмоток применяют в сварочных генераторах, режим короткого замыкания которых является нормой.

*Нагрузочные характеристики* генераторов смешанного и параллельного возбуждения аналогичны по виду, однако, в случае большого числа витков последовательной обмотки (при сильной последовательной обмотке), нагрузочные характеристики генератора смешанного возбуждения могут располагаться *выше* его характеристики холостого хода.

При снятии *регулирующих характеристик* генератора смешанного возбуждения постоянное значение напряжения поддерживают с помощью регулировочного реостата, включенного в цепь параллельного возбуждения. Вид регулировочных характеристик показан

на рис. 2.8, в. В случае усиленной обмотки последовательного возбуждения постоянство напряжения при изменении тока нагрузки достигается меньшим током в параллельной цепи, чем в случае нормального возбуждения (кривая 2).

## 2.6. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Условия включения на параллельную работу генераторов параллельного возбуждения.** Мощность генератора должна соответствовать мощности питаемых им приемников электроэнергии. В случае значительной мощности приемников возникает потребность одновременной (параллельной) работы генераторов. Если с течением времени потребляемая мощность меняется, то необходимо подключать к сети или отключать от нее часть генераторов. Наконец, для проведения ремонта отдельного генератора его нужно вывести из работы в общей сети, переведя его нагрузку на другие генераторы.

Условия включения на параллельную работу рассмотрим на примере двух генераторов параллельного возбуждения (рис. 2.9, а).

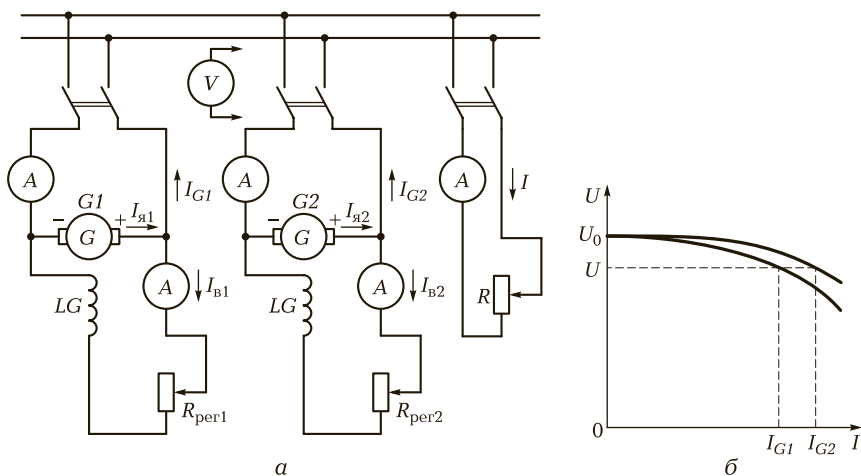


Рис. 2.9. Параллельная работа генераторов параллельного возбуждения: а — схема включения; б — распределение тока между генераторами

Предположим, что генератор  $G1$  подключен к общим шинам и нагружен током  $I_{G1}$ . Напряжение на шинах равно  $U$ . Включение на параллельную работу генератора  $G2$  должно быть выполнено так, чтобы не нарушился режим работы сети, т. е. чтобы при включении генератора в сети не возникли большие броски тока, а напряжение на шинах осталось прежним. Для этого необходимо выполнить следующие два условия.

**Первое условие.** ЭДС  $E_{G2}$  подключаемого генератора  $G2$  должна быть равна напряжению  $U$  сети (напряжение сети в данном случае равно напряжению на выводах первого генератора). При этом ток нагрузки подключаемого генератора после его включения в сеть будет равен нулю, т. е. этот генератор не будет ни отдавать мощность в сеть, ни потреблять ее из сети. Достигнуть равенства  $E_{G2} = U$  можно путем регулировки тока возбуждения  $I_{B2}$  подключаемого генератора.

Если оба генератора, включаемые на параллельную работу, находятся в момент включения в режиме холостого хода, то первое условие сводится к равенству ЭДС генераторов:  $E_{G1} = E_{G2}$ .

**Второе условие.** Полярность подключаемого генератора  $G2$  должна соответствовать полярности генератора  $G1$  (в общем случае — полярности сети). Это означает, что к выводу генератора  $G1$ , имеющему полярность «+», должен быть подключен вывод генератора  $G2$  той же полярности. При невыполнении этого условия мы получим контур с последовательным согласным соединением двух генераторов.

В этом контуре, обладающим весьма малым сопротивлением, будет действовать суммарная ЭДС генераторов. При этом ток достигнет недопустимого значения, что может вызвать круговой огонь по коллекторам и разрушение генераторов.

Соблюдение двух указанных условий включения генераторов на параллельную работу проверяется вольтметром постоянного напряжения. Вольтметр должен быть включен между одним из выводов подключаемого генератора и одноименным выводом генератора, работающего на нагрузку. Если вольтметр дает нулевое показание, то приведенные условия выполнены.

**Перевод нагрузки с одного генератора на другой.** Предположим, что генератор  $G1$  работает на нагрузку. После включения генератора  $G2$  на параллельную работу с генератором  $G1$  (с соблюдением условий включения) ток нагрузки генератора  $G2$  равен нулю. Пусть требуется частично перевести нагрузку с генератора  $G1$  на генератор  $G2$ . При этом необходимо сохранить неизменным напряжение  $U$  на общих шинах.

Выясним, каким образом можно решить поставленную задачу. Выразим общее напряжение генераторов через их ЭДС и падения напряжения в их сопротивлениях:

$$U = E_{G1} - I_{G1}R_{G1}; \quad U = E_{G2} - I_{G2}R_{G2},$$

где  $R_{G1}$  — сопротивление между выводами генератора  $G1$ , т. е. сопротивление параллельного соединения цепи якоря и цепи обмотки возбуждения генератора;  $R_{G2}$  — то же для генератора  $G2$ .

Теперь выразим из записанных уравнений токи нагрузки генераторов:

$$I_{G1} = \frac{E_{G1} - U}{R_{G1}}; \quad I_{G2} = \frac{E_{G2} - U}{R_{G2}}. \quad (2.12)$$

Из уравнений (2.12) видно, что для изменения токов нагрузки генераторов нужно изменить их ЭДС  $E_{G1}$  и  $E_{G2}$ . ЭДС, в свою очередь, регулируется путем изменения токов возбуждения  $I_{в1}$  и  $I_{в2}$ . Для увеличения нагрузки генератора его ЭДС следует повысить путем увеличения тока возбуждения этого генератора. Для перевода части нагрузки с генератора  $G1$  на генератор  $G2$  необходимо *увеличить ток возбуждения  $I_{в2}$* . Чтобы выполнить при этом условие постоянства напряжения  $U$ , необходимо одновременно *уменьшить ток возбуждения  $I_{в1}$* .

Если продолжать уменьшать ток возбуждения разгружаемого генератора и увеличивать ток возбуждения нагружаемого, то разгружаемый генератор перейдет в режим двигателя. Ток нагрузки этого генератора изменит в этом случае направление на обратное.

**Распределение нагрузки между параллельно работающими генераторами.** Включаемые на параллельную работу генераторы могут иметь неодинаковые внешние характеристики, что объясняется различиями значений сопротивлений обмоток якорей и дополнительных полюсов, неодинаковой реакцией якоря и неодинаковым насыщением магнитных систем машин. По внешним характеристикам генераторов, построенных на одной координатной плоскости, можно судить о том, как будет распределяться нагрузка между генераторами при включении их на параллельную работу. Легко увидеть, что генератор, имеющий более жесткую (более пологую) внешнюю характеристику, нагружается при параллельной работе (при данном напряжении на шинах) в большей степени, чем генератор с более мягкой характеристикой (см. рис. 2.9, б). Для параллельной работы желательно, чтобы генераторы имели совпадающие внешние характеристики. Неравномерное распределение токов в случае несовпадающих характеристик может быть исправлено регулировкой токов возбуждения.

**Параллельная работа генераторов смешанного возбуждения.** Предположим, что два генератора смешанного возбуждения (см. рис. 2.8, а) включены на параллельную работу по той же схеме, что и генераторы параллельного возбуждения (см. рис. 2.9, а). Если ток  $I_{G1}$  первого генератора по какой-либо причине увеличится, то увеличится магнитный поток его последовательной обмотки возбуждения, возрастет ЭДС первого генератора, и магнитное поле усилится. Это приведет к еще большему увеличению тока  $I_{G1}$ . Будет происходить нагружение генератора  $G1$  с одновременным разгрузением генератора  $G2$ . Таким образом, параллельная работа генераторов смешанного возбуждения, включенных по указанной схеме, оказывается невозможной. Для того чтобы обеспечить устойчивость параллельной работы, необходимо включить уравнивающий провод между зажимами последовательных обмоток генераторов, соединенными с одноименными зажимами их якорей. В этом случае случайное увеличение тока одного из генераторов распределится между последовательными обмотками всех параллельно включенных генераторов, и их совместная работа будет протекать нормально.

## 2.7. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТИПЫ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Электромашинный усилитель (ЭМУ)** — это электрическая машина, работающая в режиме генератора и предназначенная для усиления электрических сигналов. Электромашинные усилители применяются в системах автоматизированного регулирования и управления, в частности для питания относительно мощных исполнительных двигателей, а также в качестве вспомогательных машин для различных электроприводов. ЭМУ обеспечивают управление большими мощностями путем изменения малой мощности.

Простейший ЭМУ — *генератор постоянного тока независимого возбуждения* (см. подразд. 2.3): изменяя ток возбуждения, можно управлять напряжением на зажимах генератора. Таким образом, сравнительно малая мощность в цепи обмотки возбуждения управляет большой мощностью в цепи якоря. Источником энергии при этом служит приводной двигатель. (Для сравнения: в электронных транзисторных усилителях переменный сигнал малой мощности управляет поступлением энергии от источника постоянного напряжения, находящегося в коллекторной цепи.)

*Коэффициент усиления мощности* (отношение мощности на выходе усилителя к мощности на входе обмотки возбуждения)

достигает у генераторов независимого возбуждения значения 100.

Коэффициент усиления можно увеличить, используя *каскадную* схему включения генераторов, когда выходное напряжение (напряжение на якоре) первого генератора подается на обмотку возбуждения второго. В этом случае мощность на выходе второго генератора может превышать мощность на входе первого (на его обмотке возбуждения) в 1000 и более раз. Каскадная схема, однако, дорогостояща и громоздка.

Чаще всего применяется ЭМУ *поперечного поля*, обладающий коэффициентом усиления от 1000 до 10000. Перед описанием принципа его работы напомним, что в машине постоянного тока имеет место реакция якоря, которая заключается во влиянии поля якоря на результирующее магнитное поле машины. Магнитное поле, созданное током якоря, перпендикулярно оси главных полюсов (см. рис. 1.12, а), и поэтому реакция якоря, рассмотренная в подразд. 1.6, называется *поперечной*. В обычной машине постоянного тока она искажает поле полюсов и нарушает коммутацию, поэтому принимаются меры для ослабления реакции якоря (см. подразд. 1.8).

В отличие от обычной машины в электромашинном усилителе поперечного поля *реакция якоря используется для получения ЭДС*. Горизонтальные щетки 1 (рис. 2.10), расположенные на поперечной оси  $qq$ , замкнуты накоротко. Помимо горизонтальных щеток, ЭМУ имеет также вертикальные щетки 2, установленные на продольной оси  $dd$ , т. е. на оси полюсов.

В обмотке возбуждения (управления)  $LG$  при работающем независимом источнике протекает ток  $I_B$ . Этот ток создает магнитный поток  $\Phi_0$ . При вращении якоря от приводного двигателя магнитный поток индуцирует в обмотке якоря ЭДС. Под действием ЭДС в обмотке якоря возникает ток, который является током короткого замыкания  $I_k$ , поскольку горизонтальные щетки замкнуты. Ток корот-

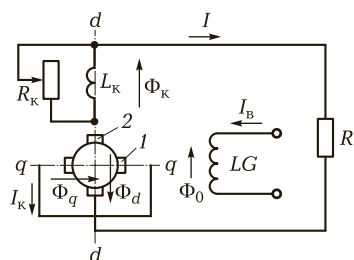


Рис. 2.10. Электрическая схема электромашиного усилителя с поперечным током:

1 — горизонтальные щетки; 2 — вертикальные щетки



кого замыкания будет довольно значительным даже при малом магнитном потоке  $\Phi_0$ .

Ток  $I_k$  создает поперечный поток реакции якоря  $\Phi_r$ , направленный перпендикулярно оси полюсов. Под действием этого потока в обмотке якоря наводится ЭДС, приложенная между вертикальными щетками 2. Если к этим щеткам подключить нагрузку, то по ней потечет ток  $I$ .

Ток нагрузки  $I$  создает продольный поток реакции якоря  $\Phi_a$ . Можно показать, что этот поток направлен *встречно* по отношению к потоку  $\Phi_0$ , созданному обмоткой управления. Таким образом, поток  $\Phi_a$  разматничивает машину. Для компенсации разматнивающего действия продольного потока в станине укладывают компенсационную обмотку  $L_k$ , поток  $\Phi_k$  которой направлен встречно потоку  $\Phi_a$ . Для настройки компенсации компенсационную обмотку шунтируют реостатом  $R_k$ .

Для улучшения условий коммутации над вертикальными щетками 2, через которые проходит ток нагрузки  $I$ , устанавливают дополнительные полюсы.

**Тахогенераторы постоянного тока** предназначены для измерения частоты вращения валов машин. Они применяются также в системах автоматического регулирования, вырабатывая *напряжение, пропорциональное частоте вращения*.

*Тахогенератор* — это генератор малой мощности, имеющий независимое возбуждение или возбуждение от постоянного магнита.

Согласно уравнению (2.7) ЭДС  $E$ , вырабатываемая генератором, пропорциональна частоте вращения  $n$ , если магнитный поток машины  $\Phi$  имеет постоянное значение. Последнее условие выполняется при постоянном токе возбуждения, а также при возбуждении от постоянного магнита.

Вал тахогенератора механически соединяют с валом машины, частоту вращения которого нужно измерить. Вольтметр со значительным внутренним сопротивлением, подключенный к зажимам тахогенератора, будет измерять напряжение, практически равное ЭДС тахогенератора. Если шкалу вольтметра проградуировать в значениях частоты, получим *тахометр*. Тахометр может быть как стрелочным, так и цифровым.

**Сварочный генератор.** Ранее отмечалось, что генератор смешанного возбуждения со встречным включением обмоток последовательного и параллельного возбуждения может быть использован для целей электросварки, поскольку обладает круто падающей внешней характеристикой и имеет малый ток короткого замыкания (см. подразд. 2.5).

Конструкция специальных сварочных генераторов также предусматривает получение крутопадающей внешней характеристики, т. е. быстрого уменьшения напряжения при увеличении тока нагруз-

ки. Идея состоит в получении реакции якоря, значительно уменьшающей магнитное поле машины с ростом тока якоря.

Конструктивной особенностью сварочного генератора является наличие так называемых *расщепленных полюсов*, когда каждый полюс состоит из двух *частичных полюсов*: северный полюс состоит из частичных полюсов  $N1$  и  $N2$ , южный — из частичных полюсов  $S1$  и  $S2$  (рис. 2.11). В сварочном генераторе установлены три комплекта щеток. Нагрузка  $R$  подключена к основным (горизонтальным) щеткам. Обмотка возбуждения начинается от дополнительной (верхней) щетки, охватывает все полюсы и оканчивается на одной из основных щеток (на правой). Направление намотки выбирается таким, чтобы полярности полюсов соответствовали показанным на рисунке.

Важно, что частичные полюсы каждого расщепленного полюса сварочного генератора имеют различное поперечное сечение. Частичные полюсы  $N1$  и  $S1$  имеют увеличенное сечение, и поэтому они слабо насыщены (поток этих полюсов распределен по большой площади, и магнитная индукция в них невелика). Напротив, полюсы  $N2$  и  $S2$  имеют уменьшенное сечение, и поэтому их насыщение велико. При работе генератора на нагрузку ток якоря создает магнитный поток  $\Phi_{я}$ , направление которого выбирается *навстречу* полю частичных полюсов  $N1$  и  $S1$  и *согласно* с полем частичных полюсов  $N2$  и  $S2$ . По этой причине поле слабо насыщенных полюсов  $N1$  и  $S1$  значительно ослабляется (по сравнению с режимом холостого хода), а поле полюсов  $N2$  и  $S2$  изменяется мало ввиду сильного насыщения этих полюсов. В результате при увеличении тока нагрузки суммарный поток одноименных полюсов значительно уменьшается, и поэтому

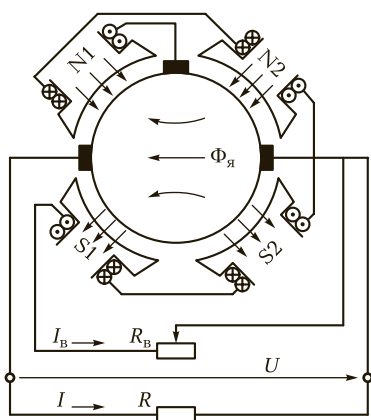


Рис. 2.11. Электрическая схема сварочного генератора

зависимость напряжения  $U$  на зажимах генератора от тока  $I$  нагрузки, т. е. внешняя характеристика, представляет собой падающую кривую, пересекающуюся с осью тока в точке с небольшим значением тока короткого замыкания.

Значение сварочного тока (тока короткого замыкания) устанавливается с помощью реостата  $R_v$  в цепи возбуждения.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Какие потери существуют в генераторе постоянного тока? Как связана электромагнитная мощность генератора с потребляемой механической мощностью?
2. От каких параметров зависит ЭДС генератора?
3. В каких случаях применяется независимое возбуждение генератора?
4. Что представляет собой характеристика холостого хода генератора? Объясните особенности этой характеристики.
5. Что такое нагрузочная характеристика? Объясните ее расположение относительно характеристики холостого хода.
6. Что показывает внешняя характеристика генератора? Какими способами ее получают? Назовите причины изменения напряжения на зажимах генератора при изменении тока нагрузки в случае независимого возбуждения?
7. С какой целью получают регулировочную характеристику генератора? Что показывает эта характеристика?
8. Опишите процесс самовозбуждения генератора постоянного тока и назовите условия самовозбуждения.
9. Каковы отличия внешней и регулировочной характеристик генератора параллельного возбуждения от соответствующих характеристик генератора независимого возбуждения? Каковы причины этих отличий?
10. Каковы особенности генератора постоянного тока последовательного возбуждения? Почему такие генераторы не применяются на практике?
11. В чем заключается преимущество генератора смешанного возбуждения перед генератором параллельного возбуждения?
12. Какие условия нужно выполнить для включения генераторов постоянного тока параллельного возбуждения на параллельную работу?
13. Каким образом можно перераспределить нагрузку между параллельно работающими генераторами? Каким образом можно перевести один из параллельно работающих генераторов в режим двигателя?
14. Какова особенность параллельной работы генераторов смешанного возбуждения?

## ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 3.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Проводник в однородном магнитном поле.** В подразд. 1.1 рассматривались явления, происходящие в проводнике, перемещаемом внешней силой в магнитном поле (см. рис. 1.1). В проводнике возникает ЭДС, и если проводник замкнут на нагрузку, то по нему течет ток. При этом возникает электромагнитная сила, направленная противоположно внешней силе. Было сделано заключение, что генерирование электроэнергии в рассмотренном проводнике происходит за счет работы внешней силы.

Теперь изменим постановку опыта: проводник, который мы, как и ранее, поместим в однородное магнитное поле, подключим не к нагрузке, а к источнику постоянного напряжения  $U$ . По проводнику потечет ток  $I$ , направление которого определяется полярностью включения источника (рис. 3.1). Внешнюю силу устраним.

На проводник с током, помещенный в магнитное поле, действует электромагнитная сила  $F_{\text{эм}}$  (сила Ампера), которая зависит от индукции магнитного поля  $B$ , активной длины проводника  $l$  и тока  $I$  согласно уравнению (1.2). Направление электромагнитной силы найдем

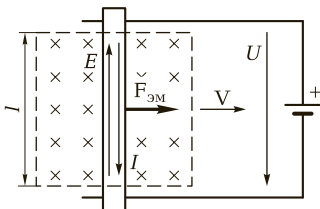


Рис. 3.1. Иллюстрация принципа действия двигателя

по правилу левой руки. Под действием силы  $F_{\text{эм}}$  рассматриваемый проводник будет перемещаться направо по параллельным проводам-направляющим. Но в проводнике, движущемся в магнитном поле, наводится ЭДС  $E$ , направление которой определяется по правилу правой руки. Это направление оказывается противоположным направлению тока, созданного источником, и поэтому такая ЭДС называется *противоЭДС*.

Итак, *механическая работа совершается за счет затраты электрической энергии* (необходим источник питания, преодолевающий возникающую противоЭДС).

Заметим существенную особенность модели, рассмотренной здесь, и модели, рассмотренной в подразд. 1.1. Один и тот же проводник, помещенный в магнитное поле, играет роль генератора (если его перемещает внешняя сила) или роль двигателя (если через него пропускают ток). Такая особенность может быть обобщена на все разнообразие электрических генераторов и двигателей: *любая электрическая машина может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя*. Это свойство называется *свойством обратимости электрических машин*.

**Уравнение двигателя.** Продолжим рассуждения, связанные с проводником в магнитном поле, на который подано напряжение от внешнего источника. Цепь рассматриваемого проводника может быть изображена в виде схемы замещения, включающей в себя два источника, включенные встречно: источник питания с напряжением  $U$  и источник противоЭДС  $E$ . Согласно второму закону Кирхгофа алгебраическая сумма ЭДС, действующих в контуре электрической цепи, равна алгебраической сумме падений напряжения на сопротивлениях контура. Для цепи, состоящей из проводника, находящегося в магнитном поле, и источника питания, получим:

$$U - E = IR,$$

где  $R$  — сопротивление проводника.

При записи уравнения учтено, что ЭДС источника питания равна напряжению  $U$ , если это идеальный источник ЭДС. Если же источник обладает ненулевым внутренним сопротивлением, то в значении  $U$  учитывается падение напряжения на внутреннем сопротивлении (такой подход при записи уравнения по второму закону Кирхгофа применяется в тех случаях, когда мы не интересуемся свойствами источника. Аналогичные соображения использовались в подразд. 2.4 при записи уравнения (2.11)).

Сопротивление подводящих параллельных проводов принимается пренебрежимо малым по сравнению с сопротивлением рассма-

триваемого провода. Если это условие не выполняется, то сопротивление подводящих проводов может быть учтено в значении  $R$ .

Выразим из записанного уравнения напряжение питания:

$$U = E + IR. \quad (3.1)$$

Получено уравнение двигателя, из которого видно, что напряжение питания двигателя больше индуцируемой противоЭДС на величину падения напряжения на сопротивлении якоря. Для перехода к уравнению генератора (2.4) нужно поменять местами напряжение и ЭДС:

$$U_{\Gamma} = E - IR$$

(напряжение генератора меньше индуцируемой ЭДС).

В курсе электротехники последнее записанное уравнение (а также уравнение (2.4)) рассматривается как уравнение источника, работающего в режиме генератора, ток в котором направлен в ту же сторону, что и ЭДС. Уравнение (3.1) рассматривается как уравнение источника, работающего в режиме двигателя, ток в котором противоположен направлению ЭДС.

Умножим обе части уравнения (3.1) на ток проводника (ток якоря)  $I$ :

$$UI = EI + I^2R. \quad (3.2)$$

Теперь заменим ЭДС индукции  $E$  на ее выражение  $Blv$  согласно формуле (1.1) (ЭДС пропорциональна индукции магнитного поля, активной длине и скорости движения проводника независимо от того, какой режим рассматривается — режим генератора или двигателя):

$$UI = BlvI + I^2R.$$

Согласно формуле (1.2) произведение  $BlvI$  дает электромагнитную силу  $F_{\text{эм}}$ , поэтому

$$UI = F_{\text{эм}}v + I^2R. \quad (3.3)$$

Выражение (3.3) показывает, что электрическая мощность источника питания, равная  $UI$ , преобразуется в двигателе в механическую мощность, равную  $F_{\text{эм}}v$ , и расходуется на тепловые потери  $I^2R$ , определяемые по закону Джоуля — Ленца. Из записанных выражений видно, что, как и в случае генератора, механическая мощность двигателя  $F_{\text{эм}}v$  равна электромагнитной мощности  $EI$  (см. также выражение (1.5)). Однако в отличие от генератора в двигателе происходит превращение электромагнитной мощности в механическую.

**Модель двигателя постоянного тока.** В подразд. 1.1 описана модель генератора постоянного тока (см. рис. 1.2). Если в этой модели

заменить нагрузку  $R$  на источник постоянного напряжения, то мы получим *модель двигателя*.

Действительно, при протекании постоянного тока по двум сторонам проволочного витка, который в данной модели является якорем, возникают электромагнитные силы, создающие вращающий момент определенного направления. Задав полярность источника и указав направление тока в каждой активной стороне витка, мы найдем, применив правило левой руки, направление силы, действующей на каждую активную сторону. Обнаружим, что эти силы действуют в противоположных направлениях, образуя пару сил, которая вращает якорь по часовой стрелке или против часовой стрелки.

Полярности щеток 2, подключенных к источнику, неизменны. Когда в процессе вращения якоря каждое из полуколец 1 выходит из контакта с одной щеткой и приходит в контакт с другой, направление тока в каждой активной стороне витка меняется на противоположное. Одновременно каждая активная сторона выходит из области одного полюса магнита и входит в область другого. В итоге получается, что через каждую половину периода вращения каждая активная сторона витка оказывается в тех же условиях, в которых была другая активная сторона до коммутации (до перехода щеток с одного полукольца на другое). В результате направление вращающего момента остается неизменным.

Таким образом, если в *модели генератора* полукольца служат для получения тока одного и того же направления (для выпрямления тока), то в *модели двигателя* полукольца обеспечивают постоянство направления вращения.

Изложенное еще раз иллюстрирует свойство обратимости электрических машин, упомянутое ранее.

**Конструкция двигателя постоянного тока.** В подразд. 1.2 описана конструкция машин постоянного тока, общая как для генераторов, так и для двигателей. На обмотку якоря двигателя подается питание от источника (сети) постоянного напряжения. Обмотка якоря содержит, в отличие от рассмотренной ранее модели, значительное число секций, которые соединяются между собой по схемам, рассмотренным в подразд. 1.4 и 1.5. Электрическая связь источника с обмоткой якоря осуществляется посредством скользящих контактов между щетками и коллекторными пластинами, которые играют ту же роль в реальном двигателе, что и полукольца в модели — они обеспечивают постоянство направления вращающего момента. На статоре имеется обмотка возбуждения, создающая магнитный поток, как и в генераторе. Далее будут рассмотрены различные схемы включения обмотки возбуждения двигателя.

При работе машины постоянного тока, как в режиме генератора, так и в режиме двигателя, по обмотке якоря течет ток, создающий собственное магнитное поле, которое влияет на результирующее поле машины.

Особенности реакции якоря в двигателе отмечены в подразд. 1.6. Там, в частности, получен вывод о том, что реакция якоря приводит к смещению физической нейтрали двигателя против направления вращения якоря, а не по направлению вращения, как это имеет место в генераторе.

В подразд. 1.7 описана коммутация в машине постоянного тока, с которой связано явление самоиндукции, возникающее в коммутируемой секции при изменении тока в ней. В качестве одной из мер улучшения условий коммутации в подразд. 1.8 названо применение добавочных полюсов, причем сделан вывод, что в двигателе после главного полюса должен следовать (в направлении вращения) добавочный полюс той же полярности (в генераторе — противоположной полярности).

Двигатели постоянного тока применяются в тех случаях, когда требуется плавное регулирование частоты вращения в широких пределах, например в электрических транспортных средствах, крановых и различных промышленных установках.

## 3.2. КПД И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ДИАГРАММА ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**КПД двигателя постоянного тока.** Электрический двигатель преобразует электрическую энергию в механическую. В процессе этого преобразования происходят потери энергии, так что полезная механическая мощность  $P_2$  на валу двигателя всегда меньше потребляемой из сети мощности  $P_1$ . Сумму всех потерь мощности обозначим  $\Sigma P$ . Тогда можем записать

$$P_1 = P_2 + \Sigma P. \quad (3.4)$$

Данное уравнение имеет тот же вид, что и уравнение (2.1), записанное для генератора, однако смысл величин  $P_1$  и  $P_2$  в случае генератора иной (практически, противоположный, см. подразд. 2.1).

Мощность  $P_1$ , потребляемая двигателем из сети, выражается произведением напряжения сети на потребляемый ток:  $P_1 = UI$  (в случае генератора аналогичной формулой выражается полезная электрическая мощность; в этом случае символом  $U$  обозначается напряжение на зажимах генератора).



Выразим полезную мощность  $P_2$  двигателя из уравнения (3.4):  $P_2 = P_1 - \sum P$ . Запишем теперь выражение коэффициента полезного действия двигателя:

$$\eta_A = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = \frac{UI - \sum P}{UI} = 1 - \frac{\sum P}{UI} = 1 - \frac{\sum P}{P_1}. \quad (3.5)$$

Итак, КПД двигателя, как и генератора, меньше единицы на величину, показывающую, какую долю от потребляемой мощности составляют потери (ср. с выражениями (2.2) и (2.3)).

**Энергетическая диаграмма двигателя постоянного тока.**

На рис. 3.2 показана энергетическая диаграмма двигателя, иллюстрирующая процесс преобразования потребляемой электрической мощности в полезную механическую (ср. с энергетической диаграммой генератора, рис. 2.1).

Смысл величин, обозначенных  $P_1$  и  $P_2$ , объяснен ранее. Смысл других величин объяснен в подразд. 2.1.

Диаграмма, показанная на рис. 3.2, предполагает, что обмотка возбуждения получает питание от того же источника, что и якорь двигателя. Это имеет место при параллельном, последовательном или смешанном возбуждении. Однако в двигателе, как и в генераторе, может быть применено также независимое возбуждение.

Из диаграммы видно, что потребляемая мощность  $P_1$  расходуется на мощность обмотки возбуждения  $P_{\text{в}}$ , а также на мощность потерь в якоре  $P_{\text{я}}$ . Оставшаяся часть представляет собой *электромагнитную мощность*  $P_{\text{эм}}$ :

$$P_1 = P_{\text{эм}} + P_{\text{я}} + P_{\text{в}}, \text{ или } P_1 = F_{\text{эм}}v + P_{\text{я}} + P_{\text{в}}, \quad (3.6)$$

поскольку, как уже указывалось (см. комментарий к уравнению (3.3)), электромагнитная мощность равна механической мощности  $F_{\text{эм}}v$ , где  $F_{\text{эм}}$  — электромагнитная сила;  $v$  — линейная скорость движения активных проводников. Электромагнитная мощность выражается

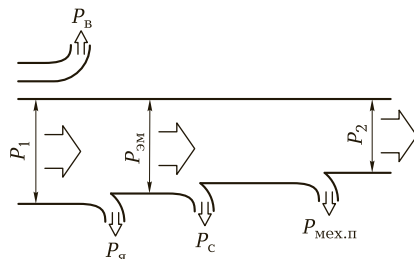


Рис. 3.2. Энергетическая диаграмма двигателя постоянного тока

также произведением  $EI$  (см. подразд. 3.1), если в двигателе используется возбуждение от постоянного магнита. Таким же образом электромагнитная мощность выражается при питании цепи возбуждения от независимого источника, а также при подключении обмотки возбуждения последовательно с якорем (эти случаи рассмотрены далее). Однако при параллельном возбуждении ток  $I$  в подводящих проводах разветвляется на ток якоря  $I_{\text{я}}$  и ток возбуждения  $I_{\text{в}}$ . В этом случае электромагнитная мощность выражается как  $EI_{\text{я}}$ , поскольку она зависит от тока, текущего в якоре.

Мощности  $P_{\text{я}}$  и  $P_{\text{в}}$  представляют, главным образом, потери на джоулеву теплоту:

$$P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}; P_{\text{в}} = I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}},$$

где  $R_{\text{я}}$  — сопротивление якоря вместе с сопротивлением щеток и сопротивлением переходных контактов;  $R_{\text{в}}$  — общее сопротивление цепи возбуждения, включающее в себя сопротивление обмотки возбуждения и сопротивление регулировочного реостата цепи возбуждения. В случае последовательного возбуждения ток якоря равен току возбуждения.

Учитывая изложенное, а также то, что мощность  $P_1$ , потребляемая двигателем, равна  $UI$ , перепишем уравнение (3.6) в виде, справедливом для параллельного и для последовательного возбуждения:

$$UI = EI_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} + I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}}. \quad (3.7)$$

В конкретном случае нужно учитывать соотношение между токами  $I$ ,  $I_{\text{я}}$  и  $I_{\text{в}}$ .

Механическую мощность  $F_{\text{эм}}v$ , равную  $EI_{\text{я}}$ , не следует путать с полезной механической мощностью  $P_2$ ; последняя меньше механической мощности на мощность потерь в стали  $P_{\text{с}}$  и мощность механических потерь  $P_{\text{мех.п}}$ , как это и показано на энергетической диаграмме (см. рис. 3.2):

$$P_2 = F_{\text{эм}}v - (P_{\text{с}} + P_{\text{мех.п}}), \text{ или } P_2 = P_{\text{эм}} - (P_{\text{с}} + P_{\text{мех.п}}). \quad (3.8)$$

### 3.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Вывод уравнения электромагнитного момента.** На проводник с током, помещенный в магнитное поле перпендикулярно его силовым линиям, действует электромагнитная сила, определяемая выражением (1.2). В подразд. 2.2 отмечалось, что индукция магнитного

поля в электрической машине не является постоянной по окружности статора. Она имеет наибольшее значение под серединой полюсного наконечника и равна нулю на нейтрали машины. Поэтому при записи уравнений пользуются понятием средней магнитной индукции  $B_{\text{ср}}$ . Тогда для средней силы, действующей на отдельный активный проводник обмотки якоря, мы можем записать:

$$F_{\text{ср}} = B_{\text{ср}} I_{\text{пр}} l, \quad (3.9)$$

где  $I_{\text{пр}}$  — ток, текущий по проводнику.

Величину  $B_{\text{ср}}$  можно выразить через поток  $\Phi$  одного полюса, как это было сделано в подразд. 2.2, исходя из определения магнитного потока, которое упоминается там же:

$$B_{\text{ср}} = \Phi / (l\tau),$$

где  $\tau$  — полюсное деление (см. формулу (1.8));  $l\tau$  — площадь полюсного деления.

Ток  $I_{\text{пр}}$  выражается через ток якоря как

$$I_{\text{пр}} = I_{\text{я}} / (2a),$$

где  $2a$  — число параллельных ветвей обмотки якоря.

Подставим выражение средней магнитной индукции и выражение тока проводника в формулу (3.9):

$$F_{\text{ср}} = \frac{\Phi I_{\text{я}}}{l\tau 2a} l = \frac{\Phi I_{\text{я}}}{2a\tau}.$$

Средний вращающий момент  $M_{\text{ср}}$ , возникающий при действии силы  $F_{\text{ср}}$ , равен произведению этой силы на ее плечо, а плечо равно радиусу  $R$  вращения проводника обмотки якоря, т.е. практически радиусу якоря:

$$M_{\text{ср}} = F_{\text{ср}} R = \frac{\Phi I_{\text{я}} R}{2a\tau}.$$

Легко показать, однако, что вращающий момент не зависит от радиуса. Действительно, полюсное деление  $\tau$ , стоящее в знаменателе последнего выражения, пропорционально радиусу якоря согласно равенству (1.8), которое перепишем в виде

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

где  $p$  — число пар полюсов статора.

Теперь подставим последнее равенство в выражение вращающего момента и получим

$$M_{\text{ср}} = \frac{\Phi I_{\text{я}} R p}{2a\pi R} = \frac{\Phi I_{\text{я}} p}{2\pi a}.$$

Электромагнитный момент машины равен сумме моментов, действующих на каждый активный проводник обмотки якоря. Если число активных проводников  $N$ , то искомым момент

$$M = M_{\text{ср}} N = \frac{\Phi I_{\text{я}} p N}{2\pi a} = \frac{p N}{2\pi a} \Phi I_{\text{я}},$$

или

$$M = c_{\text{м}} \Phi I_{\text{я}}. \quad (3.10)$$

Здесь

$$c_{\text{м}} = \frac{p N}{2\pi a} \quad (3.11)$$

— постоянная величина, определяемая конструкцией машины.

Электромагнитный момент характеризует механическую нагрузку машины, а из уравнения (3.10) следует, что с увеличением механической нагрузки увеличивается ток якоря (а значит, и подводимый ток). Это соответствует тому, что для увеличения совершаемой работы требуется увеличение потребления энергии.

Заметим, что полученное выражение электромагнитного момента справедливо не только для двигателя, в котором этот момент необходим для совершения полезной работы, но и для генератора, в котором он противодействует вращающему моменту приводного двигателя (ср. с утверждением, содержащемся в последнем абзаце подразд. 2.2).

**Уравнение моментов двигателя.** Полезный момент  $M_2$  на валу двигателя меньше электромагнитного момента  $M$ , определяемого формулой (3.10).

Во-первых, двигателю необходимо преодолеть момент холостого хода  $M_0$ , название которого обусловлено тем, что он существует даже при отсутствии нагрузки и определяется механическими потерями, а именно потерями, связанными с трением щеток о коллектор, трением в подшипниках, вентиляционными потерями, а также потерями в стали. Мощность перечисленных механических потерь обозначена ранее  $P_{\text{мех.п}}$ , а мощность потерь в стали —  $P_{\text{с}}$  (см. рис. 3.2).

Во-вторых, если происходит изменение скорости вращения ротора, то двигателю приходится преодолевать так называемый динамический момент  $M_J$ , зависящий от момента инерции  $J$  вращающегося якоря и от темпа изменения угловой скорости вращения  $\Omega$ :

$$M_J = J \frac{d\Omega}{dt}, \quad (3.12)$$

причем изменение угловой скорости  $d\Omega$  может быть как положительным (увеличение угловой скорости), так и отрицательным (уменьшение).

#### Примечания.

1. Момент инерции  $J$  характеризует инертные свойства вращающегося тела. В частности, момент инерции материальной точки массой  $m$ , находящейся от оси вращения на расстоянии  $R$ , равен  $mR^2$ ; момент инерции цилиндра массой  $m$  и радиусом  $R$  относительно оси цилиндра равен  $\frac{1}{2}mR^2$ .

2. Угловая скорость вращения  $\Omega$  выражается в системе единиц СИ в радианах в секунду. Поскольку одному обороту ротора соответствует поворот на  $2\pi$  радиан, то частоте вращения 1 об/мин соответствует угловая скорость  $2\pi/60 = \pi/30$  рад/с. Отсюда легко вычислить связь между частотой вращения  $n$ , которую в технике принято измерять в оборотах в минутах, и угловой скоростью:

$$n \text{ [об/мин]} = 9,55\Omega \text{ [рад/с]}. \quad (3.13)$$

3. Аналогом уравнения (3.12) для поступательного движения является второй закон Ньютона, утверждающий, что в инерциальной системе отсчета ускорение  $a$ , сообщаемое материальной точке действующей на нее силой  $F$ , пропорционально этой силе; в качестве коэффициента пропорциональности выступает масса  $m$  материальной точки, которая является мерой ее инертности:

$$F = ma = m \frac{dv}{dt},$$

где  $v$  — мгновенная линейная скорость материальной точки;  $a$  — ускорение представляет собой темп изменения мгновенной скорости. Если сила (равнодействующая сил) равна нулю, то ускорение равно нулю (скорость постоянна).

Заменяя в последнем выражении величины, характеризующие поступательное движение тела, на соответственные величины, характеризующие вращательное движение (силу  $F$  на момент силы  $M$ , массу  $m$  на момент инерции  $J$ , линейную скорость  $v$  на угловую скорость  $\Omega$ ), получим уравнение (3.12).

Из изложенного ранее следует уравнение моментов двигателя:

$$M = M_2 + M_0 + M_J, \quad (3.14)$$

причем в случае увеличения частоты вращения ротора динамический момент  $M_J$  положителен, и он должен быть преодолен электромагнитным моментом. В случае же уменьшения скорости вращения динамический момент уменьшается, и необходимый электромагнитный момент также уменьшается.

При работе двигателя с постоянной скоростью вращения динамический момент  $M_J$  равен нулю, и в этом случае электромагнитный момент преодолевает только статический момент сопротивления на валу двигателя  $M_{ст}$ , складывающийся из полезного момента и момента холостого хода:

$$M = M_{ст} = M_2 + M_0. \quad (3.15)$$

**Устойчивость работы двигателя.** Определяется характером зависимости электромагнитного момента  $M$  от частоты вращения  $n$  (такая зависимость называется *механической характеристикой* двигателя). При увеличении частоты вращения электромагнитный момент может как возрастать (рис. 3.3, а), так и убывать (рис. 3.3, б). На рис. 3.3 показан также график тормозного статического момента  $M_{ст}$ , увеличивающегося с ростом частоты вращения. Вид зависимости тормозного статического момента от частоты определяется особенностями того механизма, который приводится в движение рассматриваемым электродвигателем. В частности, величина  $M_{ст}$  может и не изменяться при изменении частоты. Это имеет место, например, у подъемных кранов, у механизмов подачи в металлорежущих станках.

Точка пересечения кривых  $M$  и  $M_{ст}$  соответствует равенству этих моментов и, значит, постоянству частоты вращения якоря.

Пусть двигатель имеет механическую характеристику, представленную на рис. 3.3, а, и вращается с постоянной частотой  $n$ . Если

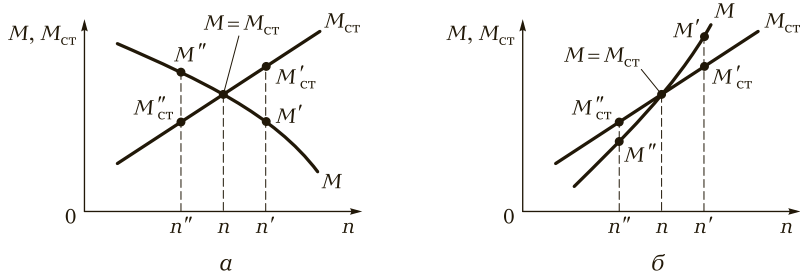


Рис. 3.3. Механические характеристики двигателей постоянного тока: а — двигатель работает устойчиво; б — устойчивая работа невозможна

по какой-либо причине частота вращения немного увеличится и станет равной  $n'$ , то, как видно из графика, *тормозной момент  $M_{ст}$  станет больше электромагнитного момента  $M$* . Поэтому частота вращения снова уменьшится до значения  $n$ , при котором выполняется равенство моментов. При случайном уменьшении частоты вращения до значения  $n''$  *электромагнитный момент  $M$  станет больше тормозного момента  $M_{ст}$* . Якорь снова разгонится до частоты  $n$ . Таким образом, при любом изменении частоты вращения происходит возвращение двигателя к условию равенства вращающего и тормозного моментов. Такой случай в физике называют состоянием устойчивого равновесия.

Теперь рассмотрим случай, когда двигатель имеет механическую характеристику, представленную на рис. 3.3, б, и вращается с постоянной частотой  $n$ . Если частота вращения немного увеличится и станет равной  $n'$ , то *электромагнитный момент  $M$  станет больше тормозного момента  $M_{ст}$* , что вызовет дальнейшее увеличение частоты вращения. Произойдет так называемый «разнос» двигателя, характеризующийся чрезвычайным увеличением частоты вращения, что может привести к разрушению машины. Если же частота вращения уменьшится и станет равной  $n''$ , то *тормозной момент  $M_{ст}$  станет больше электромагнитного момента  $M$* , частота еще больше уменьшится, и в результате двигатель остановится. Таким образом, механические характеристики, показанные на рис. 3.3, б, соответствуют совершенно неустойчивой работе двигателя.

В дальнейшем будут рассмотрены характеристики двигателей с разным способом возбуждения магнитного потока и будет выяснено, от чего зависит вид каждой из характеристик.

### 3.4. ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

**Схема двигателя параллельного возбуждения.** Двигатели постоянного тока, как и генераторы, классифицируются по способу включения обмотки возбуждения: двигатели независимого, параллельного, последовательного, смешанного возбуждения. Мощность, затрачиваемая на возбуждение магнитного потока, составляет 1...5% номинальной мощности двигателя.

На рис. 3.4, а приведена схема двигателя параллельного возбуждения, на которой использованы стандартные буквенные обозначения:  $M$  — двигатель;  $LM$  — обмотка возбуждения двигателя. Данную

схему полезно сравнить со схемой генератора параллельного возбуждения (см. рис. 2.6). Источник питания двигателя создает в подводящих проводах ток  $I$ , который разветвляется на ток якоря  $I_{\text{я}}$  и ток возбуждения  $I_{\text{в}}$ :

$$I = I_{\text{я}} + I_{\text{в}}, \quad (3.16)$$

в генераторе же ток якоря разветвляется на ток нагрузки и ток возбуждения (см. уравнение (2.10)).

Перепишем уравнение (3.7), показывающее преобразование потребляемой мощности в электромагнитную мощность, с учетом уравнения (3.16):

$$U(I_{\text{я}} + I_{\text{в}}) = EI_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} + I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}}; \quad UI_{\text{я}} + UI_{\text{в}} = EI_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} + I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}},$$

где сопротивление цепи возбуждения  $R_{\text{в}}$  включает в себя сопротивление обмотки возбуждения и сопротивление регулировочного реостата  $R_{\text{рег}}$ . Предполагается, что пуск уже осуществлен и пусковой реостат выведен (см. далее).

Напряжение  $U$  приложено как к якорю двигателя, так и к цепи возбуждения, включенной параллельно якорю. По закону Ома  $U = I_{\text{в}} R_{\text{в}}$ , поэтому  $UI_{\text{в}} = I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}}$ . Тогда записанное ранее уравнение преобразуется к виду

$$UI_{\text{я}} + I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}} = EI_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} + I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}},$$

т. е.

$$UI_{\text{я}} = EI_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}. \quad (3.17)$$

Итак, для двигателя параллельного возбуждения получено уравнение, аналогичное уравнению (3.2). Нужно учесть, что произведение  $UI_{\text{я}}$  представляет не всю мощность, потребляемую двигателем, а ее часть, хотя и бóльшую. Из уравнения (3.17) сразу получаем уравнение

$$U = E + I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \quad (3.18)$$

справедливое для случая параллельного возбуждения. (Сравните уравнение (3.18) с уравнением (3.1), записанным для случая возбуждения от постоянного магнита. Отметим, что при параллельном возбуждении ток возбуждения невелик по сравнению с номинальным током якоря, и поэтому значение  $I_{\text{я}}$  мало отличается от значения тока  $I$  в подводящих проводах.)

Отличие схемы двигателя параллельного возбуждения от схемы генератора состоит также в наличии пускового реостата, показанного в правой части рис. 3.4, а. Пусковой реостат предназначен для уменьшения пускового тока. Разберем вопрос пуска двигателя подробнее.



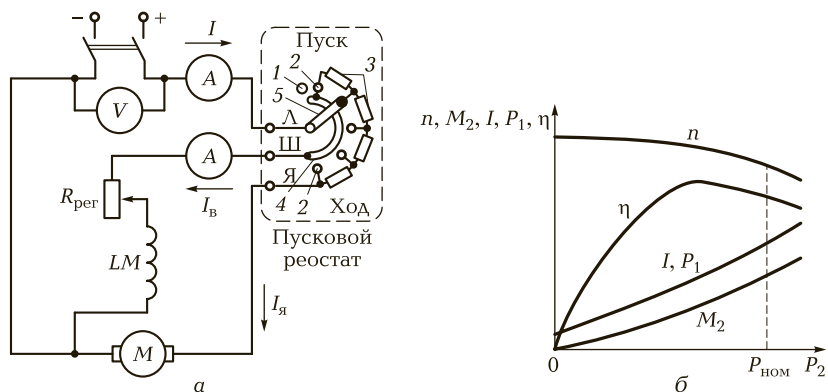


Рис. 3.4. Двигатель параллельного возбуждения:

а — схема с пусковым реостатом: 1 — холостой контакт; 2 — рабочие контакты; 3 — секции пускового реостата; 4 — контактная дуга; 5 — скользящий контакт; б — рабочие характеристики

**Пуск двигателя в ход.** Выразим из уравнения двигателя (3.18) ток якоря

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}}. \quad (3.19)$$

ПротивоЭДС  $E$ , согласно формуле (2.7), прямо пропорциональна частоте вращения якоря  $n$  и главному магнитному потоку машины  $\Phi$ . При пуске, когда частота вращения  $n$  равна нулю, будет равна нулю и противоЭДС  $E$ . Тогда выражение тока якоря в начальный момент времени примет вид

$$I_{\text{я.пуск}} = \frac{U}{R_{\text{я}}}. \quad (3.20)$$

Сопротивление якоря  $R_{\text{я}}$  — малая величина, и в случае *прямого пуска* (в случае прямого включения обмотки якоря в сеть постоянно-го напряжения) ток якоря может достичь значения, превышающего номинальный ток в 10 — 20 раз и даже более, в зависимости от мощности двигателя.

При пуске двигателя в ход стремятся предотвратить возникновение чрезмерного пускового тока. Используются следующие способы пуска двигателя в ход:

- прямой пуск (для двигателей мощностью до нескольких сотен ватт, у которых  $R_{\text{я}}$  относительно велико);

- пуск с помощью пускового реостата, включаемого последовательно в цепь якоря;
- пуск при пониженном напряжении.

**Пусковой реостат** состоит из нескольких секций 3 (см. рис. 3.4, а). Перед пуском скользящий контакт 5 находится на холостом контакте 1. Для пуска двигателя скользящий контакт перемещают на первый рабочий контакт 2 (в положение «пуск»), и тогда в цепь якоря включается сопротивление  $R_{п.р}$  всех секций пускового реостата. При этом ток якоря принимает значение

$$I'_{я.пуск} = \frac{U}{R_я + R_{п.р}}. \quad (3.21)$$

Значение  $R_{п.р}$  подбирают таким, чтобы пусковой ток  $I'_{я.пуск}$  был в 1,5—2,5 раза больше номинального тока якоря  $I_{я.ном}$  (говоря о пусковом токе, часто подразумевают не ток якоря, а ток в подводящих проводах. В схеме, показанной на рис. 3.4, а, измеряется именно этот ток). Если пусковой ток будет слишком малым, то малым будет и пусковой вращающий момент, и тогда при значительной нагрузке на валу двигателя пуск двигателя может оказаться невозможным.

По мере разгона двигателя увеличивается противоЭДС, и поэтому уменьшается ток якоря. Сопротивление пускового реостата поэтапно уменьшают, переводя его скользящий контакт на последующие рабочие контакты. При каждом переключении ток якоря скачком увеличивается приблизительно до первоначального значения  $I'_{я.пуск}$ , а затем, по мере увеличения частоты вращения и роста противоЭДС, снова уменьшается. В конце разгона скользящий контакт устанавливают на последний рабочий контакт (в положение «ход»), соответствующий полностью выведенному пусковому реостату. Пусковой реостат рассчитан на кратковременную работу в процессе пуска двигателя и не предназначен для регулирования тока, поэтому в течение работы двигателя скользящий контакт должен оставаться в положении «ход».

На протяжении всей пусковой операции и далее, во время работы двигателя, цепь возбуждения двигателя должна постоянно находиться под полным напряжением источника питания. Для выполнения этого условия предусмотрена контактная дуга 4, имеющая постоянную электрическую связь со скользящим контактом. Кроме того, регулировочный реостат цепи возбуждения  $R_{рег}$  на время пуска выводят. Это обеспечивает наибольший пусковой момент на валу двигателя, поскольку ток возбуждения и магнитный поток будут в этом случае максимальными.

Пусковой реостат, используемый с двигателями параллельного возбуждения, имеет три зажима: зажим Л («линия») соединяет скользящий контакт с источником питания; зажим Ш («шунтовая обмотка») соединяет контактную дугу с цепью возбуждения; зажим Я («якорь») соединяет последний рабочий контакт пускового реостата с якорем двигателя.

Для автоматизации процесса пуска используются контакты, контакты которых включены параллельно секциям пускового реостата. По мере разгона двигателя контакты замыкаются, поэтапно шунтируя секции.

Пусковые характеристики двигателя определяются отношением пускового тока к номинальному потребляемому току  $I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}}$ , отношением пускового вращающего момента к номинальному моменту  $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$ , временем пуска, а также плавностью пуска.

Пуск двигателя параллельного возбуждения при пониженном напряжении осуществим при питании двигателя и обмотки возбуждения от разных источников, т. е. в случае независимого возбуждения.

**Рабочие характеристики двигателя.** Представляют собой зависимости от нагрузки (т. е. от полезной мощности  $P_2$  на валу) различных величин: частоты вращения якоря  $n$ ; вращающего (электромагнитного) момента  $M$ ; полезного момента на валу  $M_2$ ; тока в подводящих проводах  $I$ ; потребляемой мощности  $P_1$ ; коэффициента полезного действия  $\eta$ . Характеристики получают экспериментально при неизменном значении напряжения питания  $U$ . Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения (кроме кривой  $M$ ) показаны на рис. 3.4, б.

Разберем особенности указанных зависимостей.

Зависимость частоты вращения  $n$  от полезной мощности  $P_2$  двигателя параллельного возбуждения является *жесткой*. Это означает, что частота вращения изменяется незначительно с ростом нагрузки. Чтобы выяснить, от каких факторов зависит частота вращения, подставим в уравнение двигателя (3.18) выражение противоЭДС (2.7):

$$U = c_e \Phi n + I_{\text{я}} R_{\text{я}}.$$

Выразим из записанного выражения частоту вращения

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{c_e \Phi}. \quad (3.22)$$

С увеличением полезной мощности увеличивается ток якоря, значит, увеличивается падение напряжения  $I_{\text{я}} R_{\text{я}}$  на сопротивлении якоря, и числитель дроби в уравнении (3.22) уменьшается. Частота

вращения  $n$  при этом должна уменьшаться. Однако рост тока якоря усиливает также размагничивающее действие реакции якоря, в результате чего магнитный поток  $\Phi$  двигателя уменьшается. Последний фактор влияет на частоту вращения в сторону ее увеличения, поскольку величина  $\Phi$  стоит в знаменателе выражения  $n$ . В результате совместного действия двух указанных факторов частота вращения с ростом нагрузки будет либо уменьшаться, либо увеличиваться. Увеличение частоты имеет место в двигателях параллельного возбуждения мощностью несколько киловатт и более, поскольку реакция якоря проявляется в них более значительно, чем в маломощных машинах.

Можно показать, что в случае возрастающей зависимости частоты вращения от полезной мощности на валу двигателя работа двигателя неустойчива. (В подразд. 3.3 вопрос об устойчивости обсуждался на основе анализа механических характеристик.) Для обеспечения устойчивости работы на главные полюсы двигателя помещают с т а б и л и з и р у ю щ у ю о б м о т к у, которую соединяют последовательно с обмоткой якоря, причем так, чтобы ее магнитный поток был направлен согласно с потоком параллельной обмотки возбуждения. Магнитный поток стабилизирующей обмотки компенсирует размагничивающее действие реакции якоря. В результате получается почти прямолинейная зависимость частоты вращения от полезной мощности, слабо наклоненная к оси абсцисс, так что при изменении полезной мощности от нуля до номинального значения частота уменьшается всего на 2... 8 %.

*Полезный момент  $M_2$  двигателя, измеряемый в кгс·м, связан с полезной мощностью на валу  $P_2$ , Вт, следующим соотношением:  $P_2 = M_2 \Omega$ , где  $\Omega$  — угловая скорость вращения, рад/с. (Записанное соотношение аналогично известной связи между мощностью  $P$ , которую развивает сила  $F$  при поступательном движении тела со скоростью  $v$ :  $P = Fv$ ; для формального перехода к выражению мощности для вращательного движения выполняются замена величин на соответственные величины: сила заменяется на момент силы или момент пары сил, скорость — на угловую скорость.)*

Таким образом, получим

$$M_2 = \frac{P_2}{\Omega} = \frac{9,55P_2}{n}, \quad (3.23)$$

где использована связь (3.13) между частотой вращения  $n$ , об/мин, и угловой скоростью  $\Omega$ .

Итак, полезный момент пропорционален полезной мощности и обратно пропорционален частоте вращения. Поскольку, согласно

изложенному ранее, частота вращения несколько уменьшается с увеличением полезной мощности, полезный момент растет немного быстрее, чем полезная мощность. Поэтому график зависимости полезного момента от полезной мощности отклоняется немного вверх от прямой линии пропорциональной зависимости.

*Вращающий (электромагнитный) момент  $M$*  двигателя при постоянной частоте вращения, согласно выражению (3.15), больше полезного момента  $M_2$  на величину момента холостого хода  $M_0$ . При отсутствии нагрузки (при холостом ходе) вращающий момент равен моменту холостого хода. Тогда, согласно формуле (3.10), при холостом ходе  $M = M_0 = c_M I_{я0} \Phi$ , где  $I_{я0}$  — ток якоря при холостом ходе.

График зависимости вращающего момента от полезной мощности повторяет по форме график полезного момента, но проходит выше него на величину  $c_M I_{я0} \Phi$ .

Ток якоря  $I_я$  выразим из формулы (3.10):

$$I_я = \frac{M}{c_M \Phi}.$$

С увеличением полезной мощности растет как вращающий момент, так и ток якоря. Поскольку при увеличении тока якоря усиливается размагничивающее действие реакции якоря, магнитный поток  $\Phi$  немного уменьшается. В результате ток якоря растет с увеличением полезной нагрузки несколько быстрее, чем вращающий момент.

*Потребляемый ток  $I$*  в двигателе параллельного возбуждения отличается незначительно от тока якоря, а в двигателе независимого и последовательного возбуждения равен ему.

*Потребляемая мощность  $P_1$* , равная произведению  $UI$ , изменяется так же, как и потребляемый ток  $I$ , поскольку напряжение питания  $U$  в процессе получения характеристик не изменяется.

*Кэффициент полезного действия  $\eta$* , определяемый отношением полезной мощности  $P_2$  к потребляемой мощности  $P_1$ , равен нулю при отсутствии нагрузки, т. е. при нулевой полезной мощности. При увеличении нагрузки КПД довольно быстро возрастает и достигает максимального значения при нагрузке, равной примерно половине от номинальной нагрузки, после чего незначительно уменьшается. Максимальное значение КПД двигателя составляет 75... 95%; чем больше мощность двигателя, тем больше его максимальный КПД.

Двигатели параллельного возбуждения применяются для привода станков и машин, требующих постоянства частоты вращения при изменениях нагрузки, а также возможности регулировать частоту вращения. Способы регулирования обсуждаются в подразд. 3.5.

### 3.5. РЕВЕРСИРОВАНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

**Реверсирование двигателя.** Чтобы выполнить реверсирование двигателя, т. е. изменить направление вращения его якоря, необходимо изменить направление вращающего момента  $M$ . Вращающий момент, согласно формуле (3.10), пропорционален магнитному потоку и току якоря. Направление магнитного потока определяется направлением тока возбуждения. Поэтому для изменения направления вращения нужно изменить направление тока якоря или тока возбуждения, т. е. поменять местами концы проводов, присоединенных к зажимам якоря, или концы проводов, присоединенных к зажимам обмотки возбуждения (это выполняется с помощью переключателя). Изменение полярности источника питания не приведет к реверсированию, поскольку при этом одновременно изменятся направления тока якоря и тока возбуждения.

**Регулирование частоты вращения.** Возможность плавного регулирования частоты вращения в широких пределах является одним из основных достоинств двигателей постоянного тока. Способы регулирования можно выявить, анализируя уравнение (3.22).

1. Регулирование частоты вращения с помощью регулировочного реостата в цепи якоря. Если последовательно с якорем включить регулировочный реостат, то частота вращения будет определяться уравнением

$$n = \frac{U - I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{рег.я}})}{c_e \Phi}, \quad (3.24)$$

записанным на основании уравнения (3.22). Регулировочный реостат в цепи якоря, в отличие от пускового реостата, должен быть рассчитан на длительную работу (на рис. 3.4, *a* этот реостат не показан.) При анализе процессов, происходящих при введении сопротивления  $R_{\text{рег.я}}$  будем учитывать, что напряжение питания остается постоянным, и ток возбуждения также не изменяется, поскольку напряжение питания целиком подается в цепь возбуждения независимо от наличия регулировочного реостата в цепи якоря. При рассмотрении данного способа регулирования частоты вращения будем считать, что в цепи возбуждения регулировочный реостат отсутствует.

Итак, пусть якорь двигателя вращается с постоянной частотой  $n$ . Увеличим сопротивление регулировочного реостата  $R_{\text{рег.я}}$ . Согласно уравнению (3.24), частота вращения при этом должна уменьшиться.

Однако якорь обладает значительной инертностью, характеризуемой моментом инерции  $J$  (см. подразд. 3.3), и поэтому частота вращения не изменится мгновенно. Также и противоЭДС  $E$ , зависящая от частоты вращения согласно формуле (2.7), первоначально останется прежней. Что касается тока якоря, то при увеличении сопротивления в цепи якоря он уменьшится практически сразу и одновременно уменьшится вращающий момент  $M$ , пропорциональный току якоря в соответствии с формулой (3.10). Вращающий момент станет меньше нагрузочного, определяемого свойствами механизма, приводимого во вращение двигателем, и частота вращения уменьшится. Вследствие уменьшения частоты вращения уменьшится противоЭДС, и, согласно уравнению (3.19), увеличится ток якоря  $I_{я}$ . Поэтому вращающий момент, ранее уменьшившийся, теперь увеличится, и в результате снова установится стационарный режим работы двигателя, при котором вращающий и нагрузочный моменты равны друг другу. Новая (уменьшенная) установившаяся частота вращения будет определяться уравнением (3.24).

Рассмотренный способ регулирования частоты вращения неэкономичен; он приводит к уменьшению КПД двигателя, поскольку, как можно показать, при увеличении сопротивления в цепи якоря потребляемая мощность увеличивается в большей степени, чем полезная. Данный способ применяется преимущественно с двигателями небольшой мощности.

2. Регулирование частоты вращения с помощью регулировочного реостата в цепи возбуждения. Этому способу соответствует схема, показанная на рис. 3.4, а. Сопротивление  $R_{в}$  цепи возбуждения равно сумме сопротивления  $R_{о,в}$  обмотки возбуждения и сопротивления  $R_{рег}$  регулировочного реостата. Пусть якорь двигателя вращается с постоянной частотой  $n$ . Увеличим сопротивление  $R_{рег}$  регулировочного реостата. Ток возбуждения  $I_{в}$  при этом уменьшится, и уменьшится магнитный поток  $\Phi$ . Тогда, согласно уравнению (3.22), частота вращения должна увеличиться. Но мгновенно это не происходит в силу инертности якоря. Что же касается противоЭДС  $E$ , то она изменяется практически сразу (уменьшается), будучи пропорциональной магнитному потоку, что видно из уравнения (2.7). (Сравните с рассмотренным ранее случаем изменения сопротивления в цепи якоря, когда ток возбуждения оставался постоянным и ЭДС не могла измениться мгновенно.) При уменьшении противоЭДС увеличивается ток якоря  $I_{я}$ , на что указывает уравнение (3.19).

Как известно, вращающий момент  $M$  пропорционален как току якоря, так и магнитному потоку (см. уравнение (3.10)). Но увеличение

тока якоря происходит в значительно большей степени, чем уменьшение магнитного потока, поскольку сопротивление якоря  $R_{\text{я}}$  очень мало. Таким образом, в результате указанных явлений вращающий момент увеличивается и становится больше нагрузочного момента. При увеличении вращающего момента увеличивается частота вращения. Но при этом увеличивается противоЭДС, и поэтому ток якоря уменьшается. Последнее обстоятельство приводит к тому, что вращающий момент, только что увеличившийся, теперь будет уменьшаться, пока снова не станет равным нагрузочному моменту, т. е. пока не восстановится условие вращения с новой (увеличенной) постоянной частотой, определяемой уравнением (3.22). Новое значение тока якоря определяется новым значением противоЭДС согласно уравнению (3.19).

Можно показать, что при рассмотренном способе регулирования частоты вращения потребляемая и полезная мощности изменяются примерно в равной мере, и поэтому КПД двигателя остается почти постоянным. Данный способ является экономичным и применяется часто.

Оценить диапазон регулирования частоты вращения двигателя путем изменения магнитного потока можно с помощью *регулирующей характеристики*, которая представляет собой зависимость частоты вращения  $n$  от тока возбуждения  $I_{\text{в}}$  при отсутствии нагрузки на валу, т. е. при нулевом нагрузочном моменте  $M_2$ . Ток якоря в этом случае довольно мал, и уравнение (3.22) упрощается:

$$n \approx \frac{U}{c_e \Phi}.$$

Если магнитная цепь двигателя не насыщена, то магнитный поток примерно пропорционален току возбуждения, и тогда регулирующая характеристика близка к графику обратной пропорциональности, т. е. к гиперболе; большим значениям тока возбуждения соответствуют малые значения частоты вращения, а при слишком малом токе возбуждения частота вращения очень сильно возрастает, что может привести к механическому разрушению двигателя («разнос»). Таким образом, для двигателя параллельного возбуждения опасен обрыв цепи возбуждения, когда в машине существует только остаточное магнитное поле.

На практике регулирование частоты вращения путем изменения сопротивления цепи возбуждения позволяет получить десятикратное изменение  $n$ .

Согласно уравнению (3.22) частоту вращения двигателя можно регулировать также путем изменения напряжения питания. Но это можно осуществить только при раздельном питании якоря и обмотки возбуждения, т. е. в *двигателе независимого возбуждения*.



### 3.6. ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Обмотку якоря и обмотку возбуждения двигателя постоянного тока независимого возбуждения подключают к независимым источникам постоянного напряжения так, чтобы при неизменном напряжении питания обмотки возбуждения имелась возможность регулирования напряжения питания обмотки якоря, начиная от нулевого значения (зависимость частоты вращения от напряжения питания описывается уравнением (3.22)). При этом исключается необходимость применения пускового реостата (пуск осуществляется путем постепенного увеличения напряжения питания) и обеспечивается широкий диапазон регулирования частоты вращения. Рабочие характеристики двигателей параллельного и независимого возбуждения при неизменном напряжении питания аналогичны.

**Схема генератор—двигатель.** Для регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока путем изменения питающего напряжения служит, в частности, схема генератор—двигатель (схема Г—Д), являющаяся управляемым преобразователем электромашинного типа. Схема упрощенно показана на рис. 3.5. Якорь генератора постоянного тока  $G$  непосредственно соединяется с якорем двигателя постоянного тока  $M2$ . Генератор  $G$  приводится во вращение каким-либо первичным двигателем  $M1$ , например трехфазным асинхронным или синхронным двигателем (см. гл. 9 и 13).

Обмотка возбуждения  $LG$  генератора и обмотка возбуждения  $LM$  двигателя питаются от одного и того же источника постоянного напряжения, в качестве которого может служить сеть переменного напряжения и выпрямитель. Для той же цели может использоваться

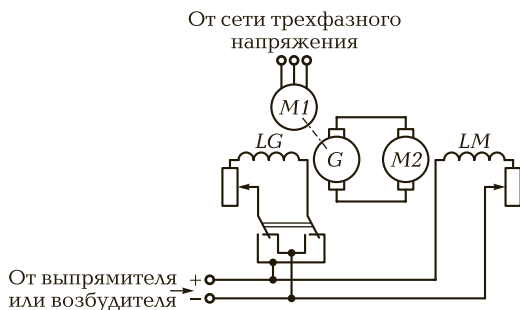


Рис. 3.5. Схема генератор—двигатель

дополнительный генератор постоянного тока, приводимый во вращение тем же первичным двигателем  $M1$ , который вращает генератор  $G$ . Дополнительный генератор, предназначенный для питания обмоток возбуждения, называется *возбудителем*. При использовании возбудителя применяется параллельная схема его возбуждения, предусматривающая регулировку тока возбуждения с целью поддержания постоянного напряжения на зажимах возбудителя.

Регулируя с помощью реостата ток в цепи катушки возбуждения  $LG$  генератора  $G$ , изменяют магнитный поток генератора и, значит, его ЭДС (см. уравнение (2.7)). При изменении ЭДС изменяется напряжение на зажимах генератора, которое одновременно является напряжением на зажимах двигателя  $M2$ . Таким способом напряжение можно изменять от номинального в сторону уменьшения (напряжение выше номинального недопустимо), при этом частота изменяется также в сторону уменьшения от номинального значения.

Переключатель в цепи обмотки возбуждения генератора  $G$  служит для реверсирования двигателя.

Для регулирования частоты от номинального значения в сторону увеличения изменяют ток в цепи катушки возбуждения  $LM$  двигателя  $M2$ . При уменьшении тока возбуждения двигателя уменьшается магнитный поток и увеличивается частота вращения.

КПД схемы  $\Gamma - \Delta$  невысок — не более 70 %.

Рассмотренный электромашинный преобразователь обеспечивает отношение наибольшей частоты вращения к наименьшей, превышающее 25. Плавное регулирование частоты в столь широком диапазоне недостижимо для двигателей переменного тока. При использовании рассмотренной здесь схемы можно получить, теоретически, еще большее отношение наибольшей и наименьшей частот. Однако чрезмерно высокая частота вращения не допускается по условиям коммутации (см. подразд. 1.7), а установка слишком малой частоты вращения достигается за счет малого напряжения питания, которое при этом становится сравнимым с падением напряжения на сопротивлении якоря двигателя. В этих условиях незначительные изменения нагрузки приводят к значительным колебаниям частоты вращения. При использовании автоматической компенсации падения напряжения отношение наибольшей и наименьшей частот может быть увеличено до 10 000.

**Применение полупроводниковых преобразователей.** От схемы  $\Gamma - \Delta$  можно отказаться, если использовать *тиристорный преобразователь напряжения*.

**Примечание.** Тиристор — это полупроводниковое устройство, имеющее четырехслойную  $p - n - p - n$ -структуру.

ру с тремя  $p-n$ -переходами. Если на внешние электроды тиристора подать напряжение, меньшее определенного напряжения включения, тогда ток, текущий через тиристор, будет малым (сопротивление тиристора — высоким). Напряжение включения можно существенно уменьшить, если подать управляющее напряжение на его внутренний электрод, называемый *управляющим*. Тем самым управляющее напряжение *открывает* тиристор.

Основным узлом тиристорного преобразователя (рис. 3.6) является трехфазный выпрямитель, включающий в себя шесть мощных тиристоров  $VS1 \dots VS6$  (выпрямитель преобразует переменное напряжение в пульсирующее напряжение одной полярности; принцип работы выпрямителя рассматривается в курсе «Электронная техника»). На вход выпрямителя поступает трехфазная система напряжения от трансформатора  $T$ . Открывание тиристоров осуществляется автоматической *системой импульсно-фазового управления*, от которой на управляющие электроды тиристоров поступают импульсы с фазовыми сдвигами, учитывающими фазовые сдвиги трехфазной системы напряжений.

Дроссели  $L1$  и  $L2$  предназначены для ограничения уравнивающих токов, текущих между тройками тиристоров. Дроссель  $L3$  предназначен для сглаживания пульсаций напряжения, формируемого на выходе трехфазного выпрямителя.

Обмотка возбуждения  $LM$  двигателя получает питание от отдельного неуправляемого диодного выпрямителя.

Схема с тиристорным преобразователем более компактна, чем схема генератор—двигатель. Она надежна, имеет существенно боль-

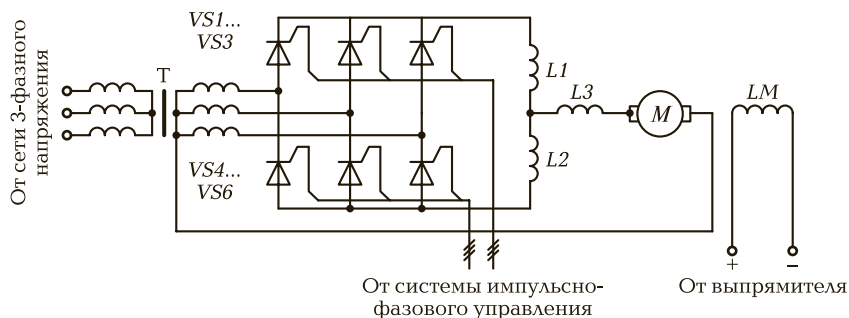


Рис. 3.6. Схема управления двигателем с помощью тиристорного преобразователя

ший КПД и высокое быстродействие (малое быстродействие схемы Г—Д определяется значительной индуктивностью обмотки возбуждения генератора, питающего двигатель постоянного тока).

Для управления двигателями постоянного тока небольшой мощности вместо тиристорного преобразователя может быть использовано питание якоря двигателя от *двухполюсного выпрямительного моста*, который, в свою очередь, подключается к регулируемому автотрансформатору (см. подразд. 7.1), соединенному с сетью переменного напряжения. Цепь возбуждения двигателя питается от источника постоянного напряжения через регулировочный реостат, как и в схеме генератор — двигатель. Регулируя ЭДС вторичной обмотки автотрансформатора за счет изменения числа используемых витков этой обмотки (изменяя положение подвижного контакта автотрансформатора), регулируют напряжение на якоре двигателя, а значит, и частоту вращения якоря.

**Импульсное регулирование частоты вращения.** Осуществляется с помощью схемы, показанной на рис. 3.7, а. Важным узлом этой схемы является электронный ключ (ЭК), выполняемый на основе тиристора. Функция ключа состоит в периодическом разрыве цепи, питаемой источником постоянного напряжения  $U_0$ . Кратковременный управляющий импульс от генератора импульсов (ГИ) поступает на управляющий электрод тиристора  $VS$  и открывает его. Время открытого состояния тиристора определяется параметрами  $LC$ -цепи, шунтирующей тиристор. Поэтому при изменении частоты импульсов, приходящих от ГИ, будет изменяться отношение продолжительности  $t_{и}$  открытого состояния ключа к периоду  $T$  следования импульсов от ГИ. В течение времени  $t_{и}$  постоянное напряжение  $U_0$ , имеющееся на входе ключа, будет и на его выходе. В результате периодических замыканий и размыканий ключа напряжение на его выходе представляет собой последовательность прямоугольных импульсов с амплитудой  $U_0$  (рис. 3.7, б). Среднее напряжение  $U_{ср}$  на выходе электронного ключа определяется упомянутым отношением промежутков времени:

$$U_{ср} = \frac{t_{и}}{T} U_0,$$

а частота вращения двигателя постоянного тока зависит именно от среднего значения напряжения на его зажимах. Таким образом, изменение частоты управляющих импульсов приводит в рассматриваемой схеме к изменению частоты вращения.

Дроссель  $L_2$  предназначен для сглаживания пульсаций тока якоря  $I_{я}$ ; при размыкании электронного ключа в дросселе возникает ЭДС

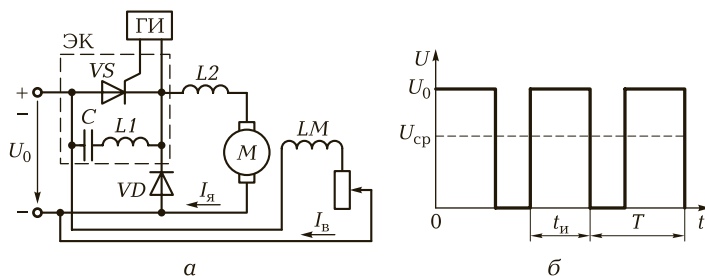


Рис. 3.7. Импульсное регулирование частоты вращения:

а — схема; б — импульсы напряжения

самоиндукции, которая препятствует мгновенному исчезновению тока. Однако и при наличии дросселя  $L2$  ток прекратился бы мгновенно, если бы в схеме не был предусмотрен диод  $VD$ . Действительно, при отсутствии диода цепь тока якоря оказывается разомкнутой, когда разомкнут электронный ключ. Когда ключ замкнут, ток через диод не проходит, потому что он включен в обратном (непроводящем) направлении относительно источника напряжения  $U_0$ .

Данная схема, как и тиристорный преобразователь, обеспечивает плавное регулирование частоты вращения двигателя в широком диапазоне. Схема импульсного регулирования обеспечивает малое изменение частоты вращения при изменении вращающего момента, т. е. его механическая характеристика является жесткой. Недостатком схем импульсного регулирования и тиристорного преобразователя является импульсный характер тока, что ухудшает условия коммутации.

### 3.7. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО И СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

**Двигатель последовательного возбуждения.** Схема двигателя последовательного возбуждения приведена на рис. 3.8, а. У такого двигателя ток в подводящих проводах, ток якоря и ток возбуждения является одним и тем же током. Пуск двигателя последовательного возбуждения, как и двигателя параллельного возбуждения, может быть осуществлен с помощью пускового реостата. Однако в случае двигателя последовательного возбуждения этот реостат имеет два,

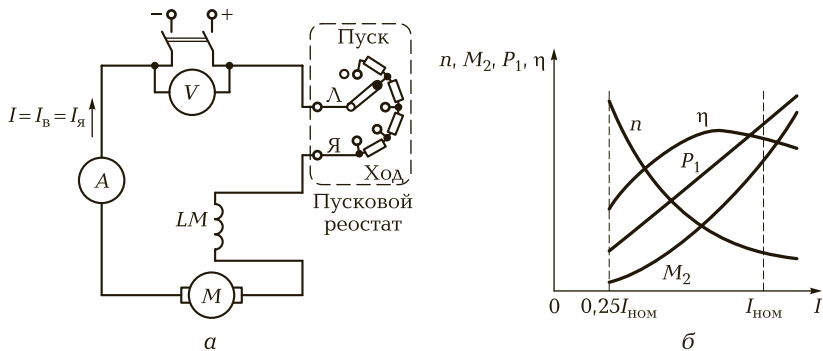


Рис. 3.8. Двигатель последовательного возбуждения:  
 а — схема с пусковым реостатом; б — рабочие характеристики

а не три зажима, поскольку параллельная ветвь в его схеме отсутствует. Контактной дуги у двухзажимного пускового реостата нет (ср. с пусковым реостатом, показанным на рис. 3.4, а).

Уравнение баланса мощности двигателя последовательного возбуждения может быть записано по аналогии с уравнением (3.17):

$$UI = EI + I^2(R_{\text{я}} + R_{\text{в}}), \quad (3.25)$$

где  $R_{\text{в}}$  — сопротивление последовательной обмотки возбуждения.

Как и при записи уравнения (3.17), предполагается, что пуск уже осуществлен и пусковой реостат выведен.

Из уравнения (3.25) следует уравнение двигателя последовательного возбуждения:

$$U = E + I(R_{\text{я}} + R_{\text{в}}). \quad (3.26)$$

**Рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения.** Они показаны на рис. 3.8, б. В качестве аргумента этих характеристик выбирают, как правило, потребляемый ток  $I$ , а не полезную мощность  $P_2$  (ср. с рис. 3.4, б). Поскольку с ростом мощности на валу потребляемый ток увеличивается (хотя и не по линейному закону), замена аргумента  $P_2$  на аргумент  $I$  не влияет существенно на общий вид характеристик. Проанализируем особенности зависимости величин, указанных на рис. 3.8, б, от потребляемого тока.

Уравнение частоты вращения  $n$  запишем по аналогии с уравнением (3.22):

$$n = \frac{U - I(R_{\text{я}} + R_{\text{в}})}{c_e \Phi}. \quad (3.27)$$

При изменении нагрузки (при изменении потребляемого тока  $I$ ) главным фактором изменения частоты вращения двигателя является изменение основного магнитного потока  $\Phi_0$  (т. е. магнитного потока, определяемого только током обмотки возбуждения). При увеличении потребляемого тока, равного в рассматриваемом двигателе току возбуждения, основной магнитный поток  $\Phi_0$  увеличивается, и вместе с ним увеличивается результирующий магнитный поток  $\Phi$ , что приводит к снижению частоты вращения согласно уравнению (3.27).

С увеличением потребляемого тока растет также падение напряжения  $I(R_{\text{я}} + R_{\text{в}})$  в цепи якоря и обмотки возбуждения. Этот фактор влияет на частоту вращения также в сторону ее уменьшения. Однако с увеличением тока усиливается размагничивающее действие реакции якоря, что замедляет рост результирующего магнитного потока. Это компенсирует в определенной степени влияние падения напряжения (результирующий поток растет медленнее, чем это происходило бы при отсутствии реакции якоря).

Из этого следует, что зависимость частоты вращения двигателя последовательного возбуждения от потребляемого тока близка к обратной пропорциональной зависимости (особенно при незначительном насыщении магнитной системы машины, когда основной магнитный поток приблизительно пропорционален току): при увеличении нагрузки частота вращения довольно быстро уменьшается, а при сбросе нагрузки до холостого хода неограниченно увеличивается (происходит явление «разноса»). Такая зависимость частоты вращения от нагрузки называется *мягкой* в отличие от жесткой характеристики, имеющей место в случае двигателя параллельного возбуждения (см. рис. 3.4, б).

Зависимость частоты вращения от тока, потребляемого двигателем последовательного возбуждения, аналогична регулировочной характеристике двигателя параллельного возбуждения (т. е. зависимости частоты вращения от тока возбуждения), поскольку в двигателе последовательного возбуждения потребляемый ток совпадает с током возбуждения.

Ввиду резкого возрастания частоты вращения при уменьшении нагрузки двигатель последовательного возбуждения не должен эксплуатироваться при нагрузке менее 20... 25 % от номинальной, а тем более при холостом ходе.

Согласно уравнению (3.10) *вращающий момент*  $M$  двигателя пропорционален магнитному потоку  $\Phi$  и току якоря  $I_{\text{я}}$  (равного в данном случае потребляемому току  $I$ ). При малых нагрузках, когда магнитная цепь машины насыщена слабо, магнитный поток полюсов пропор-

ционален току, текущему по обмотке возбуждения:  $\Phi = kI$ , где  $k$  — коэффициент пропорциональности. В этом случае уравнение (3.10) может быть приведено к виду:

$$M = c_M \Phi I = c_M k I^2, \quad (3.28)$$

т. е. при малом насыщении вращающий момент пропорционален квадрату тока. По этой причине начальная часть кривой вращающего момента  $M(I)$ , а также кривой *полезного момента*  $M_2 = f(I)$  имеет вид параболы. При больших нагрузках магнитная система насыщается в большей степени, поток начинает слабо зависеть от нагрузки (становится почти постоянной величиной), и вращающий момент становится пропорциональным первой степени потребляемого тока. Поэтому при больших нагрузках кривые  $M(I)$  и  $M_2(I)$  близки к прямым линиям (на рис. 3.8, б показан график полезного момента  $M_2$ , но не показан график вращающего момента  $M$ , который должен проходить выше графика  $M_2$  на величину момента холостого хода, см. уравнение (3.15)).

*Потребляемая мощность*  $P_1$ , равная произведению  $UI$ , зависит от потребляемого тока по линейному закону, поскольку напряжение питания  $U$  в процессе получения характеристик не изменяется.

Изменение *коэффициента полезного действия*  $\eta$  при изменении нагрузки имеет общий характер у всех электрических машин.

Двигатели постоянного тока последовательного возбуждения находят применение в устройствах, в которых требуются значительные пусковые моменты или происходят частые перегрузки. Дело в том, что в соответствии с уравнением (3.28) ток, потребляемый двигателем последовательного возбуждения при малом насыщении магнитной системы, пропорционален квадратному корню из вращающего момента ( $\sqrt{M}$ ). В двигателе параллельного возбуждения потребляемый ток пропорционален первой степени вращающего момента согласно уравнению (3.10). Поэтому при резких изменениях вращающего момента потребляемый ток, а также потребляемая мощность, испытывает в двигателе последовательного возбуждения меньшие скачки, чем в двигателе параллельного возбуждения.

Для реверсирования двигателя последовательного возбуждения применяется тот же способ, что и для реверсирования двигателя параллельного возбуждения (см. подразд. 3.5).

**Регулирование частоты вращения двигателя последовательного возбуждения.** Осуществляется следующими способами:

- изменение напряжения питания путем включения регулировочного реостата последовательно обмотке возбуждения;



- изменение тока возбуждения путем включения регулируемого реостата параллельно обмотке возбуждения;
- изменение тока возбуждения путем изменения числа используемых витков катушки возбуждения;
- изменение способа включения двигателей между собой (при одновременном использовании двух или нескольких двигателей).

Рассмотрим перечисленные способы более подробно.

Если регулировочный реостат включить последовательно двигателю, мы получим возможность регулировать частоту вращения за счет изменения питающего напряжения. При введении реостата уменьшаются одновременно напряжение, ток якоря и магнитный поток. Согласно уравнению (3.22) уменьшение напряжения влияет на частоту вращения в сторону ее уменьшения, а уменьшение тока и магнитного потока — в сторону ее увеличения. Однако определяющим фактором оказывается изменение напряжения. Итак, при введении реостата, включенного последовательно двигателю, частота вращения уменьшается.

Если регулировочный реостат включить параллельно обмотке возбуждения, ток будет ответвляться в этот реостат; ток самой обмотки возбуждения уменьшится, соответственно уменьшится магнитный поток, и частота вращения якоря увеличится согласно уравнению (3.22). Параллельное соединение обмотки возбуждения и реостата обладает меньшим сопротивлением, чем сама обмотка возбуждения, поэтому при введении реостата напряжение на обмотке возбуждения уменьшается, а на якоре двигателя увеличивается. Таким образом, изменение напряжения, происходящее при использовании данного способа, влияет на изменение частоты в ту же сторону, что и изменение тока возбуждения.

Оба описанных способа приводят к уменьшению КПД двигателя.

Частоту вращения можно также регулировать за счет секционирования обмотки возбуждения: от отдельных витков обмотки делают отводы и, подключая проводник от источника к разным отводам, изменяют число используемых витков катушки. Уменьшение числа используемых витков соответствует уменьшению магнитного потока и, значит, увеличению частоты вращения.

В тяговых установках трамваев, локомотивов метро, кранов одновременно работают несколько двигателей. Если двигатели включить параллельно (рис. 3.9, а) и вывести регулировочный реостат  $R_{\text{пер}}$  (т. е. установить нулевое значение его сопротивления), то напряжение

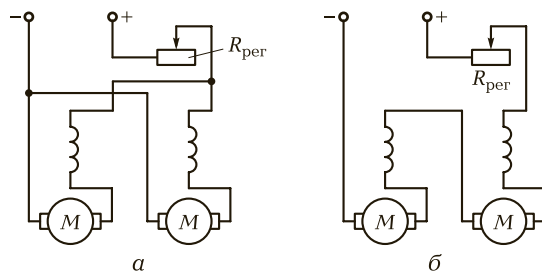


Рис. 3.9. Способы соединения двигателей (пусковая и переключающая аппаратура не показаны):

*а* — параллельное соединение; *б* — последовательное соединение

на двигателях будет равно напряжению сети, и частота вращения будет максимальной. При последовательном включении двигателей (рис. 3.9, б) напряжение питания уменьшается вдвое. Дополнительная регулировка выполняется регулировочным реостатом.

Помимо транспортных и подъемных устройств, в которых требуется, чтобы при больших нагрузках частота вращения резко уменьшалась, а вращающий момент значительно увеличивался, электродвигатели последовательного возбуждения широко применяются в качестве стартеров в двигателях внутреннего сгорания.

**Двигатель смешанного возбуждения.** Если схему, показанную на рис. 3.4, *а*, дополнить последовательной обмоткой возбуждения, включенной между якорем и пусковым реостатом, мы получим схему двигателя смешанного возбуждения. По параллельной (шунтовой) обмотке протекает ток  $I_{в,ш}$ , равный разности потребляемого тока  $I$  и тока якоря  $I_{я}$ , а по последовательной (сериесной) обмотке протекает ток  $I_{в,с}$ , равный току якоря  $I_{я}$  или разности токов  $I$  и  $I_{в,ш}$ .

Двигатели смешанного возбуждения имеют характеристики, промежуточные между характеристиками двигателей параллельного и последовательного возбуждения, но при этом необходимо, чтобы две обмотки возбуждения были соединены *согласно*, т. е. чтобы их магнитные потоки складывались.

Двигатели смешанного возбуждения применяются в тех случаях, когда требуется использовать преимущества обоих способов возбуждения, а именно: когда нужно получить значительный пусковой момент и большое ускорение при пуске, но допустимо существенное изменение частоты вращения при изменении нагрузки. В частности, такие двигатели применяются для привода электрического транспорта, компрессоров, металлорежущих станков, прокатных станов,

подъемных устройств, механических ножниц, прессов. В подразд. 3.4, где говорилось об установке стабилизирующей обмотки на двигатель параллельного возбуждения для обеспечения устойчивой работы двигателя, речь шла фактически еще об одном применении двигателя смешанного возбуждения.

Важно отметить, что, в отличие от двигателя последовательного возбуждения, двигатель смешанного возбуждения может работать в режиме холостого хода, поскольку наличие магнитного потока параллельной обмотки ограничивает частоту вращения в этом режиме (напомним, что при сбросе нагрузки на валу ток якоря становится очень малым, а ток параллельной обмотки не уменьшается, поскольку он определяется напряжением источника питания двигателя).

В зависимости от конкретного назначения характеристики двигателя смешанного возбуждения можно приблизить к характеристикам двигателя параллельного или последовательного возбуждения, для чего необходимо подобрать подходящее отношение чисел витков двух обмоток.

Частота вращения регулируется реостатом в цепи параллельной обмотки возбуждения (см. подразд. 3.5).

### 3.8. ТОРМОЖЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Будут рассмотрены три электрических способа торможения: динамическое, противовключением и рекуперативное. Все способы объединяет одна особенность: во время торможения двигатель переходит в режим генератора. Электромагнитные силы при этом направлены против движения проводников обмотки якоря (см. рис. 1.1), и, значит, электромагнитный момент направлен против вращения якоря.

**Динамическое торможение.** Чтобы создать условия динамического торможения вращающегося двигателя независимого или параллельного возбуждения, необходимо следующее:

- якорь двигателя отключить от источника питания и замкнуть на резистор сопротивлением  $R$ ;
- обмотку возбуждения оставить подключенной к источнику без изменения полярности.

В двигательном режиме направление тока якоря определяется полярностью источника питания, а ЭДС, индуцированная в якоре

при его вращении, направлена против тока (противоЭДС (см. подразд. 3.1)). После переключения якоря на резистор направление тока якоря определяется направлением ЭДС, а электромагнитная сила, действующая на каждый активный проводник с током, меняет направление в соответствии с правилом левой руки. Поэтому изменяется и направление электромагнитного момента, который из вращающегося превращается в тормозной. В процессе торможения электромагнитный момент (см. уравнение (3.10)) уменьшается. Действительно, в генераторном режиме ток якоря  $I_{\text{я}}$  определяется индуцируемой ЭДС. Поскольку ЭДС при торможении уменьшается (см. уравнение (2.7)), то уменьшаются ток якоря и электромагнитный момент.

Электрическая энергия, генерируемая в процессе торможения, превращается в теплоту в резисторе  $R$ .

Для того чтобы перевести в режим динамического торможения двигатель последовательного возбуждения, следует:

1) концы проводов, идущих к источнику, отключить от источника и присоединить к резистору сопротивлением  $R$ ;

2) поменять местами концы проводов, соединенных с последовательной обмоткой возбуждения. Последнее необходимо для того, чтобы при изменении направления тока якоря направление магнитного потока обмотки возбуждения осталось прежним.

Оба переключения осуществляются одним пакетным переключателем.

При параллельном и независимом возбуждении обмотка возбуждения во время динамического торможения двигателя получает питание от внешнего источника. В обмотке последовательного возбуждения ток течет под действием индуцируемой ЭДС, и ток возбуждения уменьшается с уменьшением ЭДС.

**Торможение противовключением.** Условия торможения противовключением совпадают в основном с условиями изменения направления вращения двигателя (реверсирования (см. подразд. 3.5)). Терминологическая разница заключается в том, что реверсирование выполняется после остановки двигателя, а торможение во время вращения. Для осуществления торможения противовключением необходимо:

1) поменять местами концы проводов, идущих от источника к якорю двигателя;

2) обмотку возбуждения оставить подключенной к источнику без изменения полярности.

При переводе двигателя в режим торможения противовключением напряжение питания меняет полярность, а направление инду-

цируемой ЭДС остается неизменным, поскольку оно определяется направлением вращения. В этих условиях ток якоря в соответствии с уравнением (3.19) становится равным

$$I_{\text{я}} = \frac{-U - E}{R_{\text{я}}} = -\frac{U + E}{R_{\text{я}}}.$$

Знак минус указывает на изменение направления тока. Значение тока становится существенно больше значения пускового тока (см. уравнение (3.20)), и поэтому схема переключения двигателя должна быть устроена таким образом, чтобы одновременно с изменением полярности источника в цепь якоря включался резистор с сопротивлением, приблизительно в 2 раза превышающим сопротивление пускового реостата (см. подразд. 3.4).

После остановки двигателя его необходимо отключить от источника питания, иначе произойдет изменение направления вращения (реверсирование).

Торможение противовключением — наиболее эффективный, но самый неэкономичный способ торможения, поскольку уменьшение механической энергии двигателя и механизма, приводимого двигателем в движение, происходит за счет электрической энергии источника питания.

**Рекуперативное торможение.** Частота вращения двигателя постоянного тока определяется уравнением (3.22), причем ток якоря  $I_{\text{я}}$  зависит от нагрузки на валу. При холостом ходе ток якоря мал, и частота вращения имеет наибольшее значение. Если к валу двигателя приложить *внешний вращающий момент, еще более увеличивающий частоту вращения*, тогда ток якоря сначала уменьшится до нуля, а затем изменит направление на противоположное. Это означает переход двигателя в режим генератора: вместо уравнения двигателя (3.18) при изменении знака тока становится справедливым уравнение генератора (2.4).

Режим работы электрической машины, при котором ток якоря равен нулю, является пограничным между режимами двигателя и генератора и называется *идеальным холостым ходом*. Частота вращения якоря в этом режиме

$$n_0 = \frac{U}{c_e \Phi}. \quad (3.29)$$

В режиме генератора электромагнитный момент машины является тормозным: осуществляется так называемое *рекуперативное торможение* (от *англ.* recuperative — восстанавливающий силы), при котором кинетическая энергия двигателя и ведомого им механизма не рассеивается в виде теплоты, а возвращается к источнику питания.

Рекуперативное торможение широко применяется на электрическом транспорте, в частности на электропоездах. Вырабатываемая при этом способе торможения энергия передается через контактную сеть другим электропоездам или в общую энергосистему.

Рекуперативное торможение применяется также на крановых устройствах для уменьшения скорости движения груза при его спуске.

Энергия, вырабатываемая при рекуперативном торможении в электромобилях, используется для подзарядки их аккумуляторов.

Из сказанного ясно, что данный способ электрического торможения не требует каких-либо схемных изменений. Кроме того, он является наиболее экономичным, поскольку сопровождается возвращением электрической энергии к источнику питания. Однако осуществляется этот способ лишь в случае, когда двигатель вращается с частотой, большей частоты идеального холостого хода, в частности, при движении электропоезда под уклон. Тем не менее рекуперативное торможение поездов используется для уменьшения скорости движения и на горизонтальных участках. С этой целью увеличивают ток возбуждения двигателя, что приводит к увеличению магнитного потока полюсов. Тогда, в соответствии с уравнением (3.22), частота вращения двигателя должна уменьшиться. Но мгновенно это не может произойти ввиду большой массы транспортного средства, и частота вращения двигателя поначалу оказывается больше частоты идеального холостого хода  $n_0$ , и двигатель работает в генераторном режиме, при котором тормозной электромагнитный момент ускоряет процесс уменьшения скорости.

Рассматриваемый способ торможения применим для двигателей независимого и параллельного возбуждения. Двигатель последовательного возбуждения не может работать в режиме холостого хода, как было показано в подразд. 3.7 (частота его идеального холостого хода стремится к бесконечности). Для осуществления рекуперативного торможения такого двигателя нужно переключить его обмотку возбуждения на параллельное или независимое возбуждение, т. е. в данном случае требуется схемное изменение.

### 3.9. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТИПЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Исполнительные двигатели.** Применяются в электромеханических системах автоматического управления и регулирования, когда требуется преобразовать электрический сигнал в механическое

перемещение — вращение вала. Примером может служить способ самоуравновешивания измерительного моста. (Измерительный мост представляет собой средство измерения электрического сопротивления, индуктивности, емкости и других параметров электрической цепи.) В процессе измерения мостом необходимо установить в одной из его ветвей — в измерительной диагонали — нулевое напряжение. Если напряжение в этой ветви не равно нулю, то оно усиливается и подается на исполнительный двигатель, который приводит в действие механизм, перемещающий подвижный контакт реостата уравнивания; при этом направление вращения двигателя определяется полярностью напряжения в измерительной диагонали. Контакт будет перемещаться до положения, при котором напряжение в измерительной диагонали становится равным нулю, так как при этом прекращается подача питания на исполнительный двигатель. (В цифровых измерительных мостах исполнительный двигатель и какие-либо подвижные части отсутствуют; все операции выполняются электронными схемами.)

*Исполнительные двигатели* — это машины малой мощности (десятки и сотни ватт). Важным требованием, предъявляемым к ним, является малая инерционность, а значит, малая масса якоря.

**Двигатель с дисковым якорем.** В исполнительных двигателях наименьшей мощности указанное требование удовлетворяется тем, что якорь выполняют в виде тонкого диска из электроизоляционного материала (например, текстолита). На обеих сторонах диска электрохимическим способом (как на печатной плате) наносят проводники обмотки. Диск вращается между полюсами, создающими магнитный поток в направлении оси. Коллектор отсутствует: щетки скользят непосредственно по поверхности диска.

**Двигатель с полым якорем.** Другой метод уменьшения инерционности якоря заключается в разделении обмотки якоря и массивного ферромагнитного сердечника. Обмотка укладывается на цилиндрическом каркасе и заливается пластмассой (возможна также печатная обмотка, как на дисковом якорю). Концы секций обмотки соединяют с пластинами коллектора, как в обычном двигателе. Внутри полого цилиндра с обмоткой неподвижно расположен ферромагнитный сердечник. Статор двигателя с полым якорем аналогичен статору обычного двигателя постоянного тока.

Обмотка исполнительного двигателя, на которую подается сигнал, когда двигатель нужно привести во вращение, называется обмоткой управления. В качестве таковой может выступать как обмотка якоря

(аналогично обычному двигателю), так и обмотка полюсов. Соответственно обмоткой возбуждения может служить обмотка полюсов или обмотка якоря. Применяется также возбуждение от постоянного магнита.

**Вентильные двигатели.** Существенным недостатком двигателей постоянного тока является наличие скользящего контакта между щетками и коллектором. Во-первых, требуется периодическая замена щеток и чистка коллектора. Во-вторых, ограничивается максимальная мощность двигателя. В-третьих, возможность искрения в коллекторно-щеточном узле делает недопустимым применение коллекторных двигателей в огнеопасных и взрывоопасных средах, в частности, в химическом производстве, а также для привода буровых установок.

Указанных недостатков лишены двигатели переменного тока (асинхронные и синхронные), рассматриваемые в разд. III. Однако последние не обладают полезными свойствами коллекторных двигателей, в частности возможностью плавного регулирования частоты вращения в широком диапазоне.

В конструкции вентильных двигателей объединяются преимущества двигателей переменного тока и коллекторных двигателей.

Чаще всего применяют **о б р а щ е н н у ю к о н с т р у к ц и ю** вентильного двигателя, в которой обмотка якоря помещается на неподвижном статоре, а обмотка возбуждения — на вращающейся части — **р о т о р е**. (Такое же распределение функций статора и ротора применяется обычно в машинах переменного тока.)

Концы обмотки возбуждения соединяются с **к о н т а к т н ы м и к о л ь ц а м и**, на которые через щетки подается питание от источника постоянного напряжения. Таким образом, щеточный контакт в рассматриваемой машине имеется, но, во-первых, мощность, потребляемая цепью возбуждения, в несколько десятков раз меньше мощности, потребляемой цепью якоря, а во-вторых, контактные кольца, в отличие от коллектора, являются однородными; в них отсутствует коммутация, и поэтому практически отсутствует искрение.

Якорная обмотка статора разделяется на несколько секций. Секции смещены в пространстве одна относительно другой. На рис. 3.10 показана трехсекционная обмотка статора, аналогичная обмотке трехфазной машины переменного тока.

Обмотка статора соединена с источником постоянного напряжения через управляемый *тиристорный коммутатор*, функция которого состоит в том, чтобы обеспечить прохождение тока по отдельным секциям обмотки статора в необходимые промежутки времени.



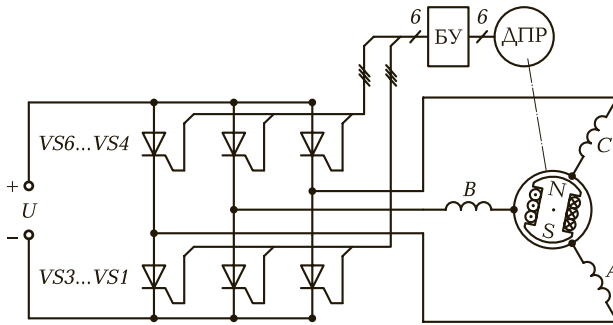


Рис. 3.10. Схема вентильного двигателя с зависимым управлением коммутатором

Схема коммутатора повторяет схему управляемого тиристорного преобразователя (см. рис. 3.6).

Различие состоит в том, что в схеме управления двигателем с применением тиристорного преобразователя источником питания является трехфазная сеть, и преобразователь выполняет функцию выпрямителя, а коммутатор в схеме вентильного двигателя обеспечивает одновременное прохождение тока по секциям обмотки статора. Входные зажимы первой упомянутой схемы являются выходными зажимами второй, и наоборот.

Тиристор является *вентилем*, т. е. элементом, проводящим ток только в одном направлении (отсюда название двигателей этого типа). Но, как отмечалось ранее в подразд. 3.6, тиристор проводит ток лишь при подаче управляющего импульса напряжения на его внутренний — управляющий — электрод.

Управляющие импульсы подаются на тиристоры поочередно, так что ток по секциям обмотки якоря  $A$ ,  $B$  и  $C$  протекает также поочередно (об источнике управляющих импульсов будет сказано далее.) В результате система токов  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  становится подобной трехфазной системе.

Благодаря поочередному протеканию токов по секциям обмотки статора магнитное поле неподвижного статора является *вращающимся*; оно подобно полю магнита, вращающегося вокруг ротора (более подробно об этом говорится в подразд. 8.1). Ротор также представляет собой электромагнит, и под действием поля статора он приходит во вращение, так что северный полюс ротора постоянно обращен к южному полюсу поля статора (из-за притяжения к нему), и наоборот.

Если управляющие сигналы поступают на тиристоры коммутатора независимо от углового положения ротора, то свойства вентильного двигателя будут практически не отличаться от свойств синхронного двигателя (см. подразд. 13.1), и преимущества машины постоянного тока будут отсутствовать.

Эти преимущества можно реализовать, если переход тиристоров из закрытого состояние в открытое и наоборот будет происходить зависимо от положения ротора. Для обеспечения *зависимого управления* работой коммутатора используются *датчики положения ротора* (ДПР).

Датчики положения ротора представляет собой устройство, состоящее из ротора с обмоткой, по которой пропускают постоянный ток, и элементов, чувствительных к магнитному полю. Ротор ДПР находится на одном валу с ротором вентильного двигателя и повторяет движение последнего. Чувствительные элементы могут быть основаны на разных принципах.

Широко используются элементы, в которых используется *эффект Холла*.

Такой элемент представляет собой полупроводниковую пластинку с электродами на торцах. В продольном направлении через пластинку пропускают постоянный ток. Когда ротор ДПР направлен своим полюсом к пластинке, его магнитное поле пронизывает плоскость пластинки перпендикулярно к ней. На свободные носители заряда, создающие ток пластинки, действует со стороны поля ротора электромагнитная сила, направление которой определяется правилом левой руки.

Под действием этой силы заряды будут смещаться перпендикулярно как силовым линиям магнитного поля, так и направлению тока, который эти заряды создают. Поэтому между торцами пластинки, параллельными направлению тока, создается разность потенциалов. Она подается в блок управления (БУ) для формирования управляющего сигнала, под действием которого открывается один из тиристор коммутатора. Число чувствительных элементов датчика положения ротора соответствует числу тиристор коммутатора.

В результате работы ДПР обеспечивается надлежащее распределение токов в секциях обмотки вентильного двигателя.

Тиристорные коммутаторы используются в вентильных двигателях большой мощности, поскольку силовые тиристоры способны пропускать большой ток (тысячи ампер). В двигателях средней мощности применяются коммутаторы на транзисторах.

Частота вращения вентильных двигателей может регулироваться теми же способами, что и коллекторных двигателей. Это осуществ-

вляется, в частности, путем регулирования напряжения питания тиристорного коммутатора.

К специальным типам двигателей постоянного тока также можно отнести двигатели с возбуждением от постоянных магнитов.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Объясните принцип работы электродвигателя на примере проводника с током, помещенного в магнитное поле.
2. Запишите уравнение напряжения на зажимах двигателя. Чем оно отличается от уравнения напряжения на зажимах генератора?
3. Какова роль коллектора в двигателе постоянного тока?
4. От каких параметров зависит электромагнитный момент двигателя постоянного тока?
5. От чего зависит устойчивость работы двигателя?
6. Какова роль пускового реостата? Опишите процедуру пуска двигателя с помощью пускового реостата.
7. Назовите другие способы пуска двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.
8. Что называется рабочими характеристиками двигателя? Объясните вид рабочих характеристик двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.
9. Каково назначение стабилизирующей обмотки?
10. Каким образом выполняется реверсирование двигателя постоянного тока параллельного возбуждения?
11. Каковы преимущества и недостатки регулирования частоты вращения двигателя параллельного возбуждения с помощью регулировочного реостата в цепи якоря; с помощью регулировочного реостата в цепи возбуждения; с помощью изменения питающего напряжения?
12. Что называется регулировочной характеристикой двигателя постоянного тока? Каковы особенности регулировочной характеристики двигателя параллельного возбуждения и как объясняются эти особенности?
13. Какими способами осуществляется независимое возбуждение двигателя постоянного тока? Каковы преимущества и недостатки независимого возбуждения двигателя перед самовозбуждением?
14. Назовите особенности рабочих характеристик двигателей последовательного возбуждения.
15. Как осуществляются реверсирование и регулирование частоты вращения двигателей последовательного возбуждения?
16. Каковы особенности двигателей смешанного возбуждения? В каких случаях применяется смешанное возбуждение?

17. Какими способами осуществляется торможение двигателей постоянного тока? В чем заключаются преимущества рекуперативного торможения?
18. Каковы особенности конструкции исполнительных двигателей постоянного тока?
19. Каковы преимущества вентильного двигателя перед коллекторными двигателями постоянного тока и синхронными и асинхронными двигателями?

# ТРАНСФОРМАТОРЫ

## II

### РАЗДЕЛ

- Глава 4. Принцип действия и устройство трансформаторов
- Глава 5. Холостой ход, рабочий режим и короткое замыкание однофазных трансформаторов
- Глава 6. Трехфазные генераторы и их параллельная работа
- Глава 7. Специальные типы трансформаторов

# ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО ТРАНСФОРМАТОРОВ

## 4.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**Назначение трансформаторов.** *Трансформатор* — это статический (не имеющий вращающихся частей) электромагнитный преобразователь с двумя или большим количеством обмоток, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения, либо, в отдельных случаях, для преобразования частоты напряжения и числа фаз. Существует много типов трансформаторов, различающихся по конструкции и назначению.

Силовые трансформаторы используются при передаче электроэнергии от электростанции к потребителю. Генераторы, установленные на электростанциях, вырабатывают электроэнергию при напряжении 10 (35) кВ. Чтобы обеспечить экономичную передачу энергии на большие расстояния, применяют повышающие трансформаторы, которые увеличивают напряжение до 750—1150 кВ. При повышении напряжения ток уменьшается, поскольку трансформатор не увеличивает передаваемую мощность (не является усилителем), и поэтому уменьшается необходимое сечение проводов, что означает значительную экономию металла. Перед подачей электроэнергии потребителям напряжение нужно вновь понизить; это выполняется понижающими трансформаторами.

Помимо силовых трансформаторов широко распространены измерительные трансформаторы напряжения, предназначенные для измерения переменного напряжения большого значения, а также измерительные трансформаторы тока, которые применяются для измерения переменного тока большого значения, а также тока в сетях высокого напряжения.

Специальные трансформаторы применяются для электросварки, питания дуговых электропечей, преобразования частоты напряже-

ния и числа фаз. Трансформаторы малых мощностей используются в устройствах автоматики, а также для работы средств связи и массовой информации.

Трансформатор любого назначения состоит из двух или нескольких обмоток, помещенных поверх замкнутого магнитопровода (сердечника), выполненного из магнитомягкого ферромагнитного материала (из электротехнической стали), как и сердечники обмоток электрических машин.

Обмотка трансформатора, подключаемая к источнику, называется *первичной*. Обмотка, подключаемая к нагрузке, называется *вторичной*. Обмотка более высокого напряжения (первичная или вторичная) называется *обмоткой высшего напряжения* (ВН). Обмотка более низкого напряжения — *обмоткой низшего напряжения* (НН). Если первичная обмотка является обмоткой ВН, то трансформатор называется *понижающим*; в противном случае трансформатор *повышающий*. Более подробно конструкции обмоток и магнитопровода описаны в подразд. 4.2.

В гл. 4 и 5 рассматриваются, главным образом, однофазные трансформаторы.

**Принцип действия трансформатора.** Он, как и генератор, (см. подразд. 1.1), основан на явлении электромагнитной индукции, которое заключается в том, что если некоторую область пространства пронизывает изменяющийся магнитный поток, то в этой области возникает электродвижущая сила, называемая *ЭДС индукции*. Если изменяющийся магнитный поток пронизывает площадь, ограниченную проводящим контуром, то в этом контуре под действием ЭДС индукции возникает электрический ток, называемый *индукционным током* (в подразд. 1.1 то же самое явление было рассмотрено с несколько иных позиций, соответствующих стоящим там целям).

Поскольку в трансформаторе, как и в электрической машине, ЭДС в одной обмотке возникает при изменении магнитного потока, созданного другой обмоткой, говорят о частном случае электромагнитной индукции — *взаимной индукции*.

Пусть первичная обмотка трансформатора подключена к источнику переменного напряжения с действующим значением  $U_1$ , а вторичная обмотка разомкнута. По первичной обмотке протекает переменный ток с действующим значением  $I_0$ , который создает магнитный поток  $\Phi_1$ . Большая часть силовых линий магнитного поля замыкается по магнитопроводу, образуя *основной магнитный моток*  $\Phi_0$ , который пронизывает витки как первичной, так и вторичной обмотки. Напомним, что магнитный поток через виток обмотки — это величина, численно равная произведению индукции  $B$  магнит-

ного поля на площадь витка  $S$  (в случае если силовые линии магнитного поля перпендикулярны плоскости витка).

Меньшая часть силовых линий магнитного поля, созданного током первичной обмотки, замыкается вне магнитопровода, по немагнитной среде, и не пронизывает витки вторичной обмотки. Эти силовые линии образуют *поток рассеяния*  $\Phi_{\sigma 1}$  первичной обмотки. Поток рассеяния не участвует в трансформировании энергии.

Итак, все витки первичной и вторичной обмоток пронизываются переменным магнитным потоком  $\Phi_0$ . Тогда согласно закону электромагнитной индукции в каждом витке обеих обмоток возникает ЭДС индукции  $e_{\text{вит}}$ , определяемая в каждый момент времени скоростью изменения магнитного потока:

$$e_{\text{вит}} = -\frac{d\Phi_0}{dt}$$

(напомним, что знак минус в этом выражении отвечает правилу Ленца).

Витки обмотки соединены между собой последовательно, и поэтому ЭДС каждой обмотки равна сумме ЭДС витков или произведению числа витков на ЭДС одного витка (можно считать, что при наличии ферромагнитного магнитопровода каждый виток пронизывается одним и тем же потоком):

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_0}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_0}{dt}, \quad (4.1)$$

где  $e_1$  и  $e_2$  — *мгновенные значения* ЭДС первичной и вторичной обмоток соответственно;  $w_1$  и  $w_2$  — числа витков обмоток.

ЭДС  $e_1$  является электродвижущей силой *самоиндукции*, поскольку она является следствием изменения тока в первичной обмотке и возникает в той же обмотке.

Пусть основной магнитный поток синусоидален:

$$\Phi_0 = \Phi_{0m} \sin \omega t, \quad (4.2)$$

где  $\Phi_{0m}$  — амплитудное значение магнитного потока;  $\omega$  — угловая частота тока и магнитного потока.

Подставим выражение потока (4.2) в уравнения (4.1) и выполним дифференцирование, учитывая, что производная по времени от функции  $\sin \omega t$  равна  $\omega \cos \omega t$ :

$$e_1 = -w_1 \frac{d(\Phi_{0m} \sin \omega t)}{dt} = -w_1 \omega \Phi_{0m} \cos \omega t; \quad e_2 = -w_2 \omega \Phi_{0m} \cos \omega t.$$

Для выяснения того, насколько ЭДС  $e_1$  и  $e_2$  отличаются по фазе от основного потока  $\Phi_0$ , удобно воспользоваться следующим равен-



ством, известным из тригонометрии (одной из формул приведения):

$$\sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) = -\cos\alpha,$$

где  $\alpha$  — некоторый угол.

Поэтому

$$e_1 = w_1\omega\Phi_{0m}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right); e_2 = w_2\omega\Phi_{0m}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (4.3)$$

т. е. ЭДС первичной и вторичной обмоток трансформатора находятся в одной и той же фазе; при этом они отстают по фазе от основного потока  $\Phi_0$  на угол  $\pi/2$ . (Напомним, что физически это означает, что обе ЭДС достигают своих максимальных мгновенных значений на четверть периода позже, чем основной поток.)

Полезно получить выражения *действующих значений* ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ .

Множитель, стоящий перед тригонометрической функцией в записи мгновенного значения (в частности, в выражениях (4.3)), представляет собой амплитуду синусоидально изменяющейся величины:

$$E_{m1} = w_1\omega\Phi_{0m}; E_{m2} = w_2\omega\Phi_{0m}. \quad (4.4)$$

Учтем связь между действующим и амплитудным значениями:

$$E_1 = \frac{E_{m1}}{\sqrt{2}}; E_2 = \frac{E_{m2}}{\sqrt{2}}.$$

Выразим угловую частоту  $\omega$  через частоту  $f$ :  $\omega = 2\pi f$ . Получим:

$$E_1 = \frac{w_1 2\pi f \Phi_{0m}}{\sqrt{2}}; \text{аналогично для } E_2.$$

Произведя вычисление числового коэффициента, получим следующие выражения действующих значений ЭДС обмоток:

$$E_1 = 4,44w_1f\Phi_{0m}; E_2 = 4,44w_2f\Phi_{0m}. \quad (4.5)$$

Как видим, отношение действующих значений ЭДС равно отношению чисел витков первичной и вторичной обмоток. То же самое приблизительно выполняется и для напряжений первичной и вторичной обмоток ( $U_1$  и  $U_2$ ):

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2}.$$

В последующих подразделах будем рассматривать, чем отличаются значения напряжения на выводах обмоток трансформатора от соответствующих значений ЭДС.

Отношение числа витков  $w_{ВН}$  обмотки высшего напряжения к числу витков  $w_{НН}$  обмотки низшего напряжения называется *коэффициентом трансформации* трансформатора  $k$ . В соответствии с последним приведенным равенством можно записать

$$k = \frac{w_{ВН}}{w_{НН}} = \frac{E_{ВН}}{E_{НН}} \approx \frac{U_{ВН}}{U_{НН}}. \quad (4.6)$$

При подключении вторичной обмотки трансформатора (обмотки ВН или НН) к нагрузке по этой обмотке и нагрузке потечет ток. Действующее значение переменного тока вторичной обмотки обозначается  $I_2$ . Действующее значение тока первичной обмотки увеличится по сравнению с  $I_0$  (с током при холостом ходе) и станет равным  $I_1$ . При этом будет выполняться следующее приблизительное соотношение действующих значений напряжения и тока:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}. \quad (4.7)$$

Далее это соотношение будет уточнено.

## 4.2. КОНСТРУКЦИИ МАГНИТОПРОВОДОВ И ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРОВ

**Конструкции магнитопроводов.** *Магнитопровод* (сердечник) улучшает магнитную связь между первичной и вторичной обмотками. Он образует магнитную цепь трансформатора, по которой замыкается основной магнитный поток.

Части магнитопровода, на которых помещаются обмотки, называются *стержнями*. Части магнитопровода, соединяющие стержни, называются *ярмами* (ед. число *ярмо*). Схемы устройства трансформаторов с магнитопроводами различных типов показаны на рис. 4.1.

Магнитопровод однофазного трансформатора с т е р ж н е в о г о т и п а имеет два стержня, соединенных сверху и снизу ярмами (рис. 4.1, а).

На каждом стержне помещают половину обмотки ВН и половину обмотки НН. Такое размещение обмоток улучшает магнитную связь между ними (на схемах условно показывают размещение каждой обмотки на своем стержне). Обмотки изолированы одна от другой, а также от магнитопровода прослойками из какого-либо изоляционного материала. Ближе к стержню располагается обмотка НН, так как ее легче изолировать от магнитопровода.

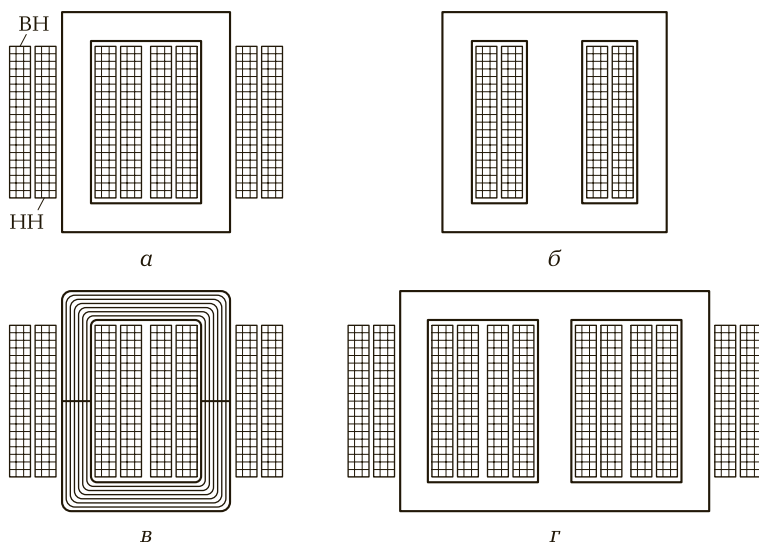


Рис. 4.1. Типы магнитопроводов трансформаторов:

*а* — однофазный трансформатор стержневого типа с магнитопроводом, набранным из плоских пластин; *б* — однофазный трансформатор броневое типа; *в* — однофазный трансформатор с ленточным магнитопроводом; *г* — трехфазный трансформатор

В целях уменьшения в магнитопроводе вихревых токов, возникающих при переменном магнитном потоке и приводящих к потерям на нагревание, магнитопровод набирают из отдельных пластин электротехнической стали, обычно толщиной 0,5 мм (т. е. выполняют ш и х т о в а н н ы м). Для того чтобы изолировать пластины друг от друга, на них наносится лак.

Возможна с т ы к о в а я конструкция магнитопровода (рис. 4.2, *а*), когда стержни и ярма собирают отдельно, затем помещают на стержни обмотки, после чего нижние и верхние ярма приставляют к стержням через изолирующие прокладки. Всю конструкцию прессуют и стягивают вертикальными шпильками. Стыковая конструкция требует довольно громоздких стяжных устройств и механической обработки стыкующихся поверхностей для уменьшения магнитного сопротивления в местах стыков.

Указанные недостатки отсутствуют в магнитопроводе, стержни и ярма которого собраны «в переплет» (рис. 4.2, *б*). Такой магнитопровод, однако, отличается сложностью сборки: для насадки обмоток на стержни верхнее ярмо должно быть расшхтовано (разобрано),

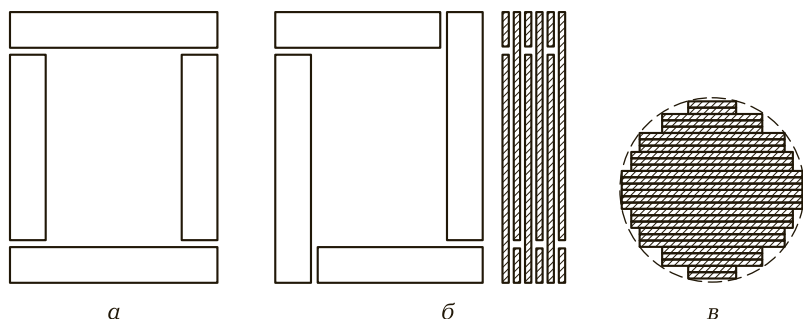


Рис. 4.2. Конструкции магнитопровода:

*а* — стыковая; *б* — стержни и ярма собраны «в переплет»; *в* — ступенчатое сечение магнитопровода

а после насадки вновь зашихтовано. Указанная конструкция наиболее распространена для силовых трансформаторов. Поверх ярм с двух сторон накладывают ярмовые балки (швеллеры), которые стягивают между собой шпильками на концах, выходящих за размеры стержней.

Стержни и ярма трансформаторов малой и средней мощности имеют прямоугольное поперечное сечение. Элементы магнитопровода трансформаторов большой мощности выполняют ступенчатыми (рис. 4.2, *в*). При этом стремятся к тому, чтобы в площади, охватываемой обмотками, было как можно меньше немагнитных промежутков. С этой точки зрения наилучшая форма сечения — круглая, но для изготовления такого магнитопровода понадобилось бы слишком большое разнообразие размеров пластин.

На рис. 4.1, *б* показан однофазный трансформатор б р о н е в о г о типа, в котором обмотки ВН и НН не делятся на части, а находятся на одном стержне и охватываются (бронируются) ярмом. Магнитный поток, пронизывающий стержень броневых трансформатора, разветвляется на две части, поэтому ярмо выполняется с вдвое меньшим сечением, чем стержень. Броневой трансформатор имеет меньшую площадь охлаждения обмоток, чем стержневой, и более чувствителен к внешним магнитным полям (ЭДС внешних помех, наводимые в двух частях обмотки стержневого трансформатора, имеют противоположные знаки и компенсируют друг друга). В броневых трансформаторах возникает трудность изолирования обмоток ВН от магнитопровода. Броневыми выполняются трансформаторы небольших мощностей.

Магнитопроводы трансформаторов малой мощности (до 1 кВ·А) выполняются из узкой ленты холоднокатаной электротехнической стали (рис. 4.1, в). Ленточные магнитопроводы делают разрезными. После насадки обмоток их соединяют встык и стягивают хомутами. Ленточные магнитопроводы бывают как стержневого, так и броневые типа.

Устройство трехфазного трансформатора показано на рис. 4.1, г. На каждом стержне находится обмотка ВН и НН отдельной фазы. Более подробная информация о конструкции трехфазных трансформаторов имеется в подразд. 6.1.

В магнитопроводах мощных трансформаторов устраивают вентиляционные каналы в плоскостях, параллельных и перпендикулярных плоскостям пластин, из которых собраны магнитопроводы. Вентиляционные каналы устраивают и в обмотках.

**Конструкции обмоток трансформаторов.** Обмотки трансформаторов высокой мощности изготавливаются из провода прямоугольного сечения. В других случаях применяют провод круглого сечения. Для упрощения процесса изготовления обмоток на относительно большие токи используют параллельное соединение проводов круглого сечения. Провода изолируются хлопчатобумажной пряжей или кабельной бумагой. Обмотки помещают чаще всего на бумажно-бакелитовом цилиндре. Для обеспечения механической и электрической прочности на этом цилиндре крепятся рейки, угловые шайбы и прочие элементы. По способу размещения на магнитопроводе обмотки делятся на дисковые и концентрические.

Дискковые (чередующиеся) обмотки, применяемые только в некоторых трансформаторах специального назначения, выполняются в виде отдельных дискообразных катушек, имеющих одинаковый диаметр. При этом катушки (части обмотки) высшего напряжения чередуются с катушками низшего напряжения (рис. 4.3, а).

Концентрические обмотки выполняют в виде цилиндров, размещаемых концентрически, т. е. одна поверх другой с общей осью симметрии (такие обмотки показаны на рис. 4.1). Концентрические обмотки подразделяются, в свою очередь, на цилиндрические, винтовые и спиральные.

В цилиндрической обмотке витки наматываются вплотную один к другому. Каждый виток состоит из одного или нескольких параллельных проводников. При большом числе витков обмотка делится на две или большее количество концентрических катушек, причем между катушками (слоями обмотки) оставляют вертикальные охлаждающие каналы. Такие обмотки используют, главным образом, в качестве обмоток ВН на напряжение до 35 кВ.

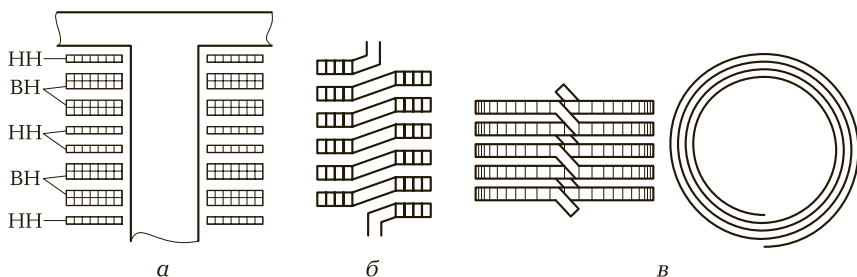


Рис. 4.3. Некоторые виды обмоток:  
 а — дисковая; б — винтовая; в — спиральная

Винтовая обмотка состоит из витков, включающих в себя несколько параллельных проводников прямоугольного сечения (от 4 до 20). Параллельно соединенные проводники при этом располагаются концентрически (рис. 4.3, б). Провод наматывают по винтовой линии, как и в случае цилиндрической обмотки, но при этом между соседними по высоте витками оставляют горизонтальные каналы для охлаждения. Поскольку отдельные параллельные проводники располагаются концентрически, их длины и, значит, активные сопротивления различны. Помимо того, эти проводники находятся в разных условиях по отношению к магнитному потоку рассеяния (см. подразд. 4.1). В результате ток в отдельных параллельных проводниках одного витка имеет разные значения. При этом потери в трансформаторе увеличиваются. Чтобы этого избежать, выполняют транспозицию (перекладку) проводников витка, так чтобы каждый из параллельных проводников занимал попеременно все возможные положения в витке (т. е. был то внутри, то в промежуточных положениях, то снаружи). Транспозиция выполняется в нескольких местах по высоте трансформатора. (На рис. 4.3, б транспозиция не показана.)

Винтовые обмотки имеют бóльшую механическую прочность, чем цилиндрические. Они применяются в качестве обмоток НН при токах более 300 А.

Схема устройства спиральной обмотки показана на рис. 4.3, в. Такая обмотка состоит из ряда последовательно соединенных катушек, расположенных по высоте стержня. Каждая катушка имеет вид плоской спирали. Между отдельными катушками оставлены горизонтальные охлаждающие каналы. Каждый виток может состоять из одного проводника или нескольких параллельных

проводников. В последнем случае применяют транспозицию проводников. Спиральные обмотки используют в качестве обмоток ВН и НН в широком диапазоне напряжений (до 220 кВ и выше).

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. В чем заключается принцип работы трансформатора? Почему можно считать, что значения ЭДС, индуцированных во всех витках любой обмотки трансформатора, практически равны?
2. Что называется основным магнитным потоком и потоком рассеяния трансформатора?
3. Какими параметрами определяется ЭДС обмотки трансформатора?
4. Как определяется коэффициент трансформации трансформатора? Каково соотношение между напряжениями и токами обмоток высшего и низшего напряжения?
5. Каковы преимущества и недостатки магнитопроводов трансформаторов стержневого и броневые типов? В каких случаях применяются магнитопроводы каждого из этих типов?
6. Какие типы обмоток трансформаторов вам известны? Каковы особенности обмоток разных типов?

## ХОЛОСТОЙ ХОД, РАБОЧИЙ РЕЖИМ И КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

### 5.1. ОПЫТ ХОЛОСТОГО ХОДА ТРАНСФОРМАТОРА

**Понятие режима холостого хода.** *Холостой ход* (ХХ) трансформатора — это режим его работы при разомкнутой вторичной обмотке. Ток вторичной обмотки в этом режиме равен нулю:  $I_2 = 0$ ; ток первичной обмотки представляет собой ток холостого хода:  $I_1 = I_0$ . У мощных трансформаторов (1 000 кВ·А и выше) ток холостого хода составляет 0,5 % номинального тока ( $I_0 = 0,005I_{\text{НОМ}}$ ) и менее; у трансформаторов мощностью порядка 25 кВ·А ток холостого хода составляет около 3 % номинального тока; у трансформаторов малой мощности ток холостого хода может достигать до 30 % номинального тока и более. (Номинальным током и прочими номинальными параметрами трансформатора называются параметры, на которые рассчитан трансформатор по условиям нагревания.)

*Опыт холостого хода* трансформатора (рис. 5.1) выполняется для определения коэффициента трансформации, тока холостого хода, мощности потерь холостого хода и сопротивлений холостого хода (смысл этих величин будет разъяснен далее.) Напряжение сети подается на однофазный регулятор напряжения (РНО), который представляет собой регулируемый автотрансформатор (см. подразд. 7.1).

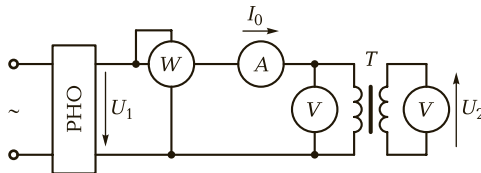


Рис. 5.1. Схема опыта холостого хода однофазного трансформатора



Условно выбранное положительное направление напряжения  $U_1$  на первичной обмотке показано на рис. 5.1 стрелкой. Для определения параметров трансформатора при холостом ходе напряжение  $U_1$  обычно устанавливается равным номинальному напряжению  $U_{1ном}$ . В качестве первичной обмотки чаще всего выбирается обмотка низшего напряжения, поскольку ток холостого хода этой обмотки выше, поэтому измеряется точнее.

Поскольку ток ХХ мал по сравнению с номинальным током (пока рассматриваем это как экспериментальный факт), то малы падения напряжения на сопротивлениях первичной обмотки, и тогда по второму закону Кирхгофа можно записать:

$$\underline{U}_1 + \underline{E}_1 \approx 0; \underline{U}_1 \approx -\underline{E}_1, \quad (5.1)$$

т. е. подаваемое напряжение компенсирует ЭДС, индуцируемую в первичной обмотке основным магнитным потоком  $\Phi_0$  (далее эти соотношения будут уточнены).

Напряжение на вторичной обмотке при отсутствии в ней тока равно ЭДС, индуцируемой основным магнитным потоком в этой обмотке:

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2, \quad (5.2)$$

аналогично тому, что ЭДС источника электроэнергии в режиме холостого хода численно равна напряжению на выводах источника.

Тогда по показаниям вольтметров, подключенных к первичной и вторичной обмоткам, можно определить *коэффициент трансформации* трансформатора по формуле (4.6). О коэффициенте трансформации трехфазного трансформатора будет сказано в подразд. 6.1.

**Примечание.** В формулах (5.1), (5.2) и далее подчеркиванием обозначены *комплексные величины*, которые включают в себя информацию о действующих значениях и фазовых углах синусоидальных ЭДС, тока и других величин. Графически комплексные величины представляют в виде векторов, причем модули этих векторов пропорциональны действующим значениям, а углы между векторами соответствуют углам разностей фаз. Не повторяя детали комплексного представления синусоидальных величин, рассматриваемые в теоретической электротехнике, будем опираться на наглядные векторные представления. Напомним, что отставание по фазе некоторой величины 1 от величины 2 на  $\pi/2$  рад отображается поворотом вектора, соответствующего величине 1, относительно вектора, соответствующего величине 2, на угол  $\pi/2$  рад ( $90^\circ$ ) по часовой

стрелке. Выражения с комплексными величинами типа (5.1) и (5.2) удобно рассматривать как *векторные равенства*.

В режиме холостого хода трансформатора переменное магнитное поле в магнитопроводе возбуждается *магнитодвижущей силой* (МДС) первичной обмотки:  $F_0 = I_0 w_1$ . Магнитодвижущая сила называется также *намагничивающей силой* (НС). Большая часть магнитных линий первичной обмотки образует основной магнитный поток  $\Phi_0$ , имеющий амплитуду  $\Phi_{0m}$ .

**Построение графика зависимости тока холостого хода от времени.** При изменении мгновенного значения тока холостого хода  $i_0$  магнитный поток  $\Phi_0$  изменяется не пропорционально ему. Характер изменения потока определяется *магнитной характеристикой* материала магнитопровода, имеющей вид *петли гистерезиса*. На рис. 5.2 показана часть магнитной характеристики, т. е. зависимости  $\Phi_0(i_0)$ . Зависимость магнитного потока от времени  $\Phi_0(t)$  на интервале несколько больше половины периода дана справа (поток изменяется синусоидально, если приложенное напряжение синусоидально, что следует выражения (4.3), учитывая приблизительное равенство ЭДС обмотки и напряжения на ней). Начало отсчета времени  $t = t_2 = 0$  совмещено с тем моментом, когда мгновенное значение потока равно нулю. Показано построение графика зависимости тока холостого хода от времени  $i_0(t)$  по графикам  $\Phi_0(t)$  и  $\Phi_0(i_0)$ .

Перед построением на осях времени графиков  $\Phi_0(t)$  и  $i_0(t)$  отмечаются одни и те же моменты времени  $t_1 \dots t_8$ . На графике  $\Phi_0(i_0)$  отмечаются точки 1 ... 8, соответствующие этим моментам.

В момент  $t_1$ , которому, согласно выбранному началу отсчета времени, приписывается отрицательное значение, поток  $\Phi_0$  отрицателен, а ток  $i_0$  равен нулю, что видно из графика  $\Phi_0(i_0)$ . Нулевое значение тока в момент  $t_1$  отображается на графике  $i_0(t)$ . В момент  $t_2 = 0$  поток имеет нулевое значение, а ток положителен. В моменты времени  $t_3$  и  $t_4$  поток принимает некоторые промежуточные значения между нулевым и максимальным. На графике  $\Phi_0(i_0)$  этим моментам соответствуют точки 3 и 4 восходящего участка. В момент  $t_5$  поток принимает наибольшее значение  $\Phi_{0m}$ . Ток в этот момент также максимален.

Далее происходит уменьшение мгновенного значения магнитного потока. В момент времени  $t_7$  поток принимает остаточное значение; ток в этот момент равен нулю. Наконец, когда поток в момент времени  $t_8$  становится равным нулю, ток отрицателен. Начиная с момента времени  $t_8$  поток меняет направление (становится отрицательным), а его абсолютное значение возрастает; абсолютное значение тока при этом также будет возрастать до амплитудного значения.

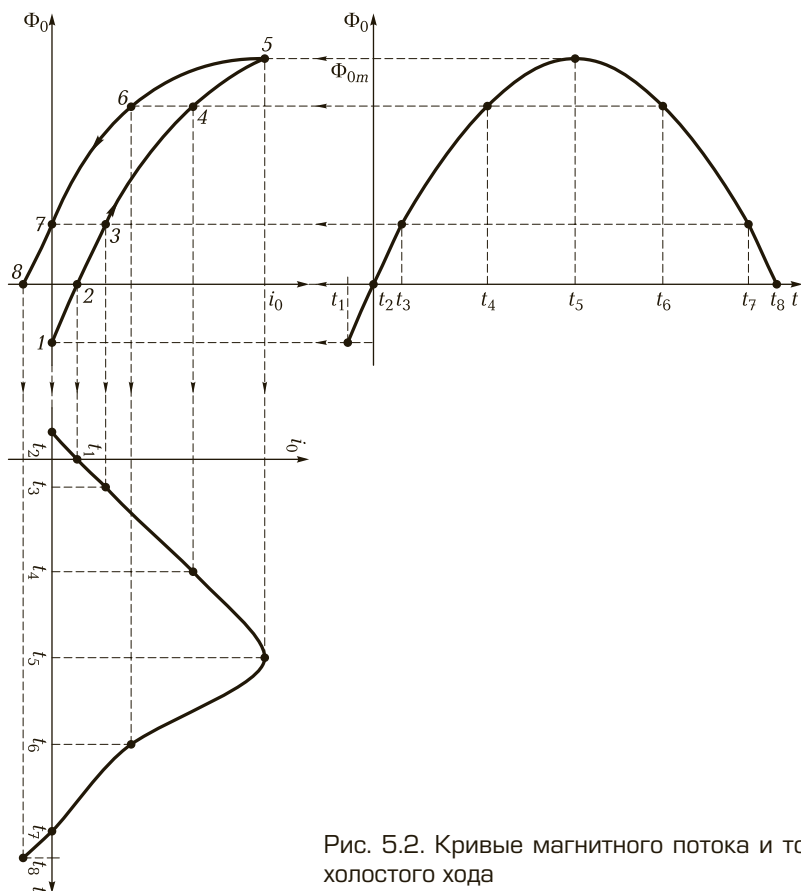


Рис. 5.2. Кривые магнитного потока и тока холостого хода

Сравнение полученного графика  $i_0(t)$  с графиком  $\Phi_0(t)$  показывает, что ток принимает нулевые значения раньше, чем магнитный поток. Другими словами, ток опережает магнитный поток по времени, а значит, и по фазе. Однако ток, как видно из построения, не является синусоидальной величиной, а понятие опережения по фазе применимо, строго говоря, лишь к синусоидальным величинам. В таких случаях реальная периодическая величина заменяется на эквивалентную синусоидальную, имеющую такое же действующее значение. Эквивалентная синусоида тока холостого хода опережает синусоиду потока на некоторое время  $\Delta t$  (оно не совпадает с промежутком времени  $\Delta t_{12}$ , равным  $(t_2 - t_1)$ ). Опережение по фазе выражается углом  $\delta = \omega \Delta t$  рад, называемым углом *гистерезисного*

опережения, или углом магнитного запаздывания (слово «опережение» относится к току, а слово «запаздывание» к магнитному потоку). Эквивалентная синусоида тока будет достигать максимального значения раньше синусоиды потока на то же самое время  $\Delta t$ .

**Векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода.**

На рис. 5.3, а показана векторная диаграмма трансформатора при ХХ. На ней отображено опережение тока холостого хода относительно основного магнитного потока: вектор тока  $I_0$  повернут относительно вектора основного потока  $\Phi_m$  на угол  $\delta$  против часовой стрелки. Вектор  $I_0$  может быть разложен на две составляющие: реактивную составляющую  $I_{0p}$ , сонаправленную с вектором магнитного потока и создающую основной магнитный поток, и активную составляющую  $I_{0a}$ , обусловленную магнитными потерями от гистерезиса (это понятие было рассмотрено ранее) и, кроме того, от вихревых токов.

**Примечание.** Комплексные ЭДС, напряжение и ток изображаются векторами, модули которых, как было упомянуто ранее, соответствуют действующим значениям этих величин. Однако модуль вектора магнитного потока соответствует его амплитуде, поскольку понятие действующего значения потока не используется.

Согласно выражениям (4.2) и (4.3) ЭДС первичной и вторичной обмоток отстают по фазе от основного магнитного потока на  $\pi/2$  рад,

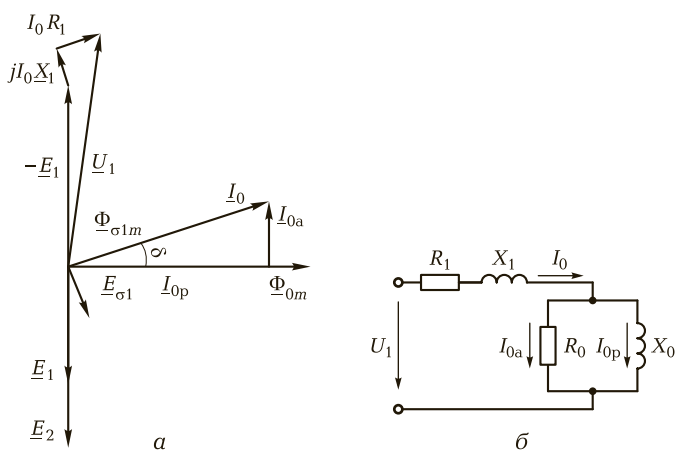


Рис. 5.3. Графические представления режима холостого хода трансформатора:

а – векторная диаграмма; б – схема замещения трансформатора

поэтому векторы  $\underline{E}_1$  и  $\underline{E}_2$  повернуты относительно вектора  $\underline{\Phi}_{0m}$  на  $\pi/2$  по часовой стрелке (первичной обмоткой выбрана обмотка НН, поэтому действующее значение  $E_1$  меньше действующего значения  $E_2$ ).

Согласно приближительному равенству (5.1) вектор напряжения  $\underline{U}_1$  источника питания должен быть почти противоположен вектору ЭДС  $\underline{E}_1$  (повернут относительно него приблизительно на угол  $\pi$  рад). Уточним это утверждение.

Для этого прежде всего напомним понятие *потока рассеяния* первичной обмотки  $\Phi_{\sigma 1}$ , который существует наряду с основным магнитным потоком  $\Phi_0$ , замыкающимся по магнитопроводу трансформатора. Поток рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$  пронизывает витки только первичной обмотки, замыкается по немагнитной среде и не участвует в трансформировании энергии. В немагнитной непроводящей среде отсутствует явление гистерезиса и вихревые токи, поэтому и отсутствует опережение по фазе тока холостого хода по отношению к потоку рассеяния. Совпадение по фазе тока  $I_0$  с магнитным потоком  $\Phi_{\sigma 1}$  отражено на векторной диаграмме.

Основной поток индуцирует в обмотках трансформатора ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ . Тогда и поток рассеяния индуцирует в первичной обмотке ЭДС  $E_{\sigma 1}$ , называемой *ЭДС рассеяния*. Мгновенные значения ЭДС  $e_1$  и  $e_2$  связаны с мгновенным значением основного потока  $\Phi_0$  законом электромагнитной индукции (4.1). Аналогичным образом мгновенное значение ЭДС рассеяния  $e_{\sigma 1}$  связано с потоком рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$  выражением

$$e_{\sigma 1} = -w_1 \frac{d\Phi_{\sigma 1}}{dt}.$$

На основании уравнений (4.1) был сделан вывод, что ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  отстают от основного потока на  $\pi/2$  рад (см. выражения (4.3)). В таком случае и ЭДС рассеяния  $E_{\sigma 1}$  отстает от потока рассеяния на  $\pi/2$  рад, что показано на рис. 5.3, а.

Нужно также учесть, что первичная обмотка обладает активным сопротивлением  $R_1$ , на котором имеется падение напряжения  $I_0 R_1$ .

С учетом ЭДС рассеяния и падения напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки уравнение (5.1), записанное по второму закону Кирхгофа, должно быть уточнено следующим образом:

$$\underline{U}_1 + \underline{E}_1 + \underline{E}_{\sigma 1} = I_0 R_1. \quad (5.3)$$

**П р и м е ч а н и е.** Для дальнейшего полезно вспомнить понятие *потокоцепления*. Как известно, электрический ток

порождает магнитное поле. Если ток течет по катушке, то магнитное поле этого тока пронизывает витки катушки, образуя магнитный поток  $\Phi$ . Если катушка имеет  $w$  витков, то потоко-сцепление  $\Psi = w\Phi$ . Потокосцепление пропорционально току, текущему по катушке. Коэффициент пропорциональности характеризует свойства катушки и называется ее *индуктивностью*  $L$ :  $\Psi = LI$ .

Запишем выражение амплитуды ЭДС рассеяния через амплитуду потока рассеяния по аналогии с выражениями (4.4):

$$E_{\sigma 1m} = w_1 \omega \Phi_{\sigma 1m} = \omega \Psi_{\sigma 1m},$$

где  $\Phi_{\sigma 1m}$  — амплитуда потока рассеяния;  $\Psi_{\sigma 1m}$  — амплитуда потоко-сцепления рассеяния,  $\Psi_{\sigma 1m} = w_1 \Phi_{\sigma 1m}$ .

В соответствии с выражением, приведенном в примечании, можем записать:

$$\Psi_{\sigma 1m} = L_{\sigma 1} I_{0m},$$

где  $L_{\sigma 1}$  — индуктивность первичной обмотки, обусловленная потоком рассеяния (это не полная индуктивность катушки, а лишь небольшая ее часть).

В таком случае амплитуда ЭДС рассеяния может быть выражена следующим образом:

$$E_{\sigma 1m} = \omega L_{\sigma 1} I_{0m}.$$

Переходя к действующим значениям ЭДС и тока, получаем  $E_{\sigma 1} = \omega L_{\sigma 1} I_0$ . Из курса электротехники известно, что индуктивное сопротивление катушки прямо пропорционально угловой частоте и индуктивности:  $X_L = \omega L$ , и тогда ЭДС рассеяния первичной обмотки может быть записана в следующем виде:

$$E_{\sigma 1} = I_0 X_{\sigma 1}, \quad (5.4)$$

где  $X_{\sigma 1}$  — индуктивное сопротивление первичной обмотки, обусловленное потоком рассеяния (индуктивное сопротивление рассеяния).

Подчеркнем, что индуктивное сопротивление первичной обмотки трансформатора обусловлено, главным образом, основным магнитным потоком. Индуктивное сопротивление рассеяния имеет существенно меньшее числовое значение. Его следовало бы обозначать  $X_{\sigma 1}$ , но, придерживаясь традиции, мы исключаем из этого обозначения символ « $\sigma$ ».

Отметим также, что очень часто величину  $X_1$  называют просто индуктивным сопротивлением первичной обмотки, не указывая на ее связь с потоком рассеяния.

Уравнение (5.4) записано для модулей величин. Рассмотрим теперь вопрос о разностях фаз. Ранее было выяснено, что ЭДС рассеяния  $E_{\sigma 1}$  отстает от потока рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$  на  $\pi/2$  рад. Поскольку поток рассеяния совпадает по фазе с током холостого хода  $I_0$ , то ЭДС  $E_{\sigma 1}$  отстает по фазе от тока также на  $\pi/2$  рад. В соответствии с этим можно записать вместо формулы (5.4) следующее выражение в комплексных числах:

$$\underline{E}_{\sigma 1} = -jI_0X_1, \quad (5.5)$$

где  $j$  — мнимая единица,  $j = \sqrt{-1}$ . Мнимая единица играет роль оператора поворота вектора, построенного на комплексной плоскости, на угол  $\pi/2$  в положительную сторону, т. е. против часовой стрелки. Мнимая единица, взятая со знаком минус, осуществляет поворот вектора на  $\pi/2$  по часовой стрелке (именно так повернут вектор  $\underline{E}_{\sigma 1}$  относительно вектора  $\underline{I}_0$  на рис. 5.3, а).

Перепишем уравнение (5.3) с учетом выражения (5.5):

$$\underline{U}_1 + \underline{E}_1 - jI_0X_1 = \underline{I}_0R_1.$$

Выразим отсюда комплекс питающего напряжения:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_0R_1 + jI_0X_1. \quad (5.6)$$

Согласно полученному уравнению питающее напряжение представляется в виде суммы падений напряжений:

- слагаемое  $(-\underline{E}_1)$  равно напряжению, которое компенсирует ЭДС индукции  $E_1$ , обусловленную основным магнитным потоком;
- $\underline{I}_0R_1$  — это падение напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки;
- $jI_0X_1$  — это падение напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния.

Уравнение (5.6) проиллюстрировано на рис. 5.3, а как сложение трех векторов, причем вектор  $\underline{I}_0R_1$  сонаправлен с вектором  $\underline{I}_0$ , а вектор  $jI_0X_1$  повернут относительно вектора  $\underline{I}_0$  на угол  $\pi/2$  рад против часовой стрелки (в положительную сторону).

Следует заметить, что рис. 5.3, а построен без соблюдения масштаба. В реальном трансформаторе числовые значения величин  $\underline{I}_0R_1$  и  $jI_0X_1$  значительно меньше числового значения  $\underline{E}_1$ , так что векторы  $(-\underline{E}_1)$  и  $\underline{U}_1$  близки к совпадению. Также амплитуда магнитного потока рассеяния  $\Phi_{\sigma 1m}$  намного меньше амплитуды основного потока  $\Phi_{0m}$ .

**Схема замещения трансформатора в режиме холостого хода.** Аналогично тому, как напряжение, компенсирующее ЭДС  $E_{\sigma 1}$ , можно представить в виде произведения тока  $I_0$  на индуктивное сопро-

тивление рассеяния  $X_1$  (см. формулу (5.4)), так и напряжение, компенсирующее ЭДС  $E_1$ , можно представить как произведение тока на полное сопротивление  $Z_0$ . Это сопротивление не будет чисто индуктивным (угол между вектором  $I_0$  и вектором  $(-E_1)$  меньше, чем  $\pi/2$  рад, на величину угла гистерезисного опережения  $\delta$ ). Итак,

$$-E_1 = I_0 Z_0, \quad (5.7)$$

где  $Z_0$  — величина комплексная (ср. с выражением (5.5), в котором величина  $X_1$  — действительная, а величина  $(-jX_1)$  — чисто мнимая).

Ток холостого хода разложен на активную и реактивную составляющие, поэтому

$$I_0 = I_{0a} + jI_{0p}. \quad (5.8)$$

В соответствии с разложением тока сопротивление  $Z_0$  может быть представлено в виде двух параллельных ветвей: по ветви с чисто активным сопротивлением  $R_0$  протекает ток  $I_{0a}$ , а по ветви с индуктивным сопротивлением  $X_0$  протекает ток  $I_{0p}$ . Сопротивление  $R_0$  отражает потери в стали (в магнитопроводе) на гистерезис и вихревые токи, а сопротивление  $X_0$  учитывает действие основного магнитного потока.

Сопротивления  $R_1$  и  $X_1$  рассматриваются как соединенные последовательно, чему соответствуют уравнение (5.6) и векторная диаграмма. В таком случае их можно объединить в полное сопротивление  $Z_1$ , так что его комплекс

$$Z_1 = R_1 + jX_1, \quad (5.9)$$

а модуль  $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$ . С учетом изложенного можно переписать уравнение (5.6) следующим образом:

$$U_1 = I_0 Z_0 + I_0 Z_1 = I_0 (Z_0 + Z_1). \quad (5.10)$$

Так как сопротивление  $Z_0$  представляется параллельным соединением ветвей, оно не может быть выражено как  $\sqrt{R_0^2 + X_0^2}$ . (Аналогичное выражение было бы справедливо для проводимостей.) Методами, используемыми в теоретической электротехнике, можно получить связь величин  $Z_0$ ,  $R_0$  и  $X_0$ , однако здесь это не понадобится.

Уравнению (5.10) соответствует схема замещения трансформатора при холостом ходе, показанная на рис. 5.3, б. В связи с тем, что основной магнитный поток  $\Phi_0$  много больше потока рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$ , выполняются следующие неравенства:  $R_0 \gg R_1$ ,  $X_0 \gg X_1$ ,  $Z_0 \gg Z_1$ . Это учитывается при практическом определении параметров трансформатора при холостом ходе; в частности, напряжение на полном сопротивлении  $Z_0$  принимается практически равным напряжению  $U_1$  на первичной обмотке трансформатора.

**Определение параметров трансформатора при холостом ходе.** Ранее указывалось, что по показаниям вольтметров, включенных в схему



опыта холостого хода (см. рис. 5.1), находят коэффициент трансформации трансформатора. Продолжим перечень величин, значения которых могут быть получены по результатам опыта холостого хода.

Показание ваттметра дает активную мощность  $P_0$ , потребляемую трансформатором при холостом ходе. В этом режиме трансформатор не питает нагрузку, и его полезная мощность равна нулю. Таким образом, мощность, измеряемая ваттметром, представляет собой мощность потерь. Ток холостого хода значительно меньше токов в обмотках трансформатора в номинальном рабочем режиме, поэтому тепловые потери (потери, обусловленные превращением энергии электрического тока в тепловую энергию) малы. В таком случае мощность  $P_0$  практически равна мощности потерь в стали (магнитоприводе) трансформатора на гистерезис и вихревые токи.

Активная мощность при холостом ходе трансформатора  $P_0 = U_1 I_0 \cos \varphi_0$ . Напряжение  $U_1$  и ток  $I_0$  определяют по показаниям приборов, после чего находят  $\cos \varphi_0$ , представляющий собой *коэффициент мощности трансформатора при холостом ходе*:

$$\cos \varphi = \frac{P_0}{U_1 I_0}. \quad (5.11)$$

Теперь можно определить активную и реактивную составляющие тока холостого хода:

$$I_{0a} = I_0 \cos \varphi_0; \quad I_{0p} = I_0 \sin \varphi_0. \quad (5.12)$$

Сопротивления трансформатора при холостом ходе (см. подразд. 5.1) определяют на практике по следующим формулам:

$$Z_0 = \frac{U_1}{I_0}; \quad R_0 = \frac{U_1}{I_{0a}} = \frac{P_0}{I_{0a}^2}; \quad X_0 = \frac{U_1}{I_{0p}}. \quad (5.13)$$

Если в схеме опыта холостого хода (см. рис. 5.1) регулировать напряжение  $U_1$  от нуля до номинального или несколько большего значения, считывая при этом показания приборов, то можно получить характеристики холостого хода трансформатора: зависимости тока холостого хода, мощности потерь и коэффициента мощности от напряжения на первичной обмотке.

## 5.2. РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА В РЕЖИМЕ НАГРУЗКИ

**Уравнения напряжений и уравнение равновесия МДС.** Если ко вторичной обмотке трансформатора подключен приемник электроэнергии, то по этой обмотке и приемнику потечет ток  $I_2$ . Магнит-

ное поле тока вторичной обмотки участвует в формировании основного магнитного потока (далее это рассматривается подробно), а также образует поток рассеяния  $\Phi_{\sigma 2}$ , который индуцирует ЭДС рассеяния  $E_{\sigma 2}$  и обуславливает индуктивное сопротивление рассеяния  $X_2$ . Вторичная обмотка обладает также активным сопротивлением  $R_2$ . При протекании тока по вторичной обмотке вместо равенства (5.2) выполняется уравнение

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - I_2 R_2 - j I_2 X_2 = \underline{E}_2 - I_2 \underline{Z}_2, \quad (5.14)$$

где  $\underline{Z}_2$  — комплекс полного сопротивления,  $\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2$ .

Уравнение (5.14) аналогично уравнению напряжения источника питания (вторичная обмотка трансформатора является источником питания для приемника электроэнергии): напряжение на выводах источника меньше ЭДС источника на величину падения напряжения на его внутреннем сопротивлении.

При протекании тока по вторичной обмотке ток первичной обмотки  $I_1$  больше тока холостого хода  $I_0$ . Уравнение напряжения, подаваемого на первичную обмотку, запишем аналогично уравнению (5.6):

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + I_1 R_1 + j I_1 X_1 = -\underline{E}_1 + I_1 \underline{Z}_1, \quad (5.15)$$

где учтено выражение (5.9).

Падение напряжения  $I_1 Z_1$  невелико по сравнению с напряжением  $\underline{U}_1$ , поэтому выполняется приближительное равенство  $\underline{U}_1 \approx -\underline{E}_1$  (хотя в режиме холостого хода это равенство выполняется точнее). Поскольку ЭДС, индуцируемая в обмотке, пропорциональна магнитному потоку согласно равенству (4.5), приходим к важному выводу: *при изменении тока в обмотке магнитный поток  $\Phi_0$  в магнитопроводе трансформатора практически не изменяется, если не изменяется напряжение питания.* В частности, магнитный поток при номинальном режиме почти такой же, как при ХХ. В режиме ХХ магнитный поток создается магнитодвижущей силой  $I_0 w_1$  первичной обмотки трансформатора. С учетом изложенного можно сделать вывод, что величина  $I_0 w_1$  определяет поток при любом режиме работы. Второй важный вывод заключается в том, что *мощность потерь в стали  $P_0$ , которая определяется в опыте ХХ, остается практически неизменной и при работе трансформатора на нагрузку.*

МДС вторичной обмотки равна  $I_2 w_2$ . Согласно правилу Ленца эта МДС стремится ослабить создающий ее магнитный поток, т.е. уменьшить значение  $\Phi_{0m}$ . Однако при уменьшении  $\Phi_{0m}$  должна уменьшиться ЭДС  $E_1$  (см. равенство (4.5)). Но ЭДС, индуцируемая в первичной обмотке, которая численно почти равна питающему напряжению, практически не изменяется. Это возможно в случае, если вместе

с током вторичной обмотки изменяется и ток первичной обмотки, так чтобы МДС первичной обмотки  $I_1 w_1$  скомпенсировала размагничивающее действие МДС вторичной обмотки  $I_2 w_2$ . Поскольку магнитный поток в магнитопроводе определяется магнитодвижущей силой  $I_0 w_1$ , то сказанное здесь можно записать математически в следующем виде:

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 = I_0 w_1. \quad (5.16)$$

Равенство (5.16) называется *уравнением равновесия МДС*. Надо учесть, что это равенство выполняется приблизительно, поскольку, как было отмечено ранее, магнитный поток только приблизительно остается постоянным при изменении тока нагузки.

**Приведение величин вторичной обмотки к первичной обмотке.** Введем обозначение

$$I_2' = \frac{I_2 w_2}{w_1} = \frac{I_2}{k}, \quad (5.17)$$

где  $k$  — коэффициент трансформации трансформатора (для определенности считаем трансформатор понижающим, и коэффициент трансформации  $k = \frac{w_{\text{вн}}}{w_{\text{вн}}} = \frac{w_1}{w_2}$ , см. выражение (4.6)).

Величина  $I_2'$  называется током вторичной обмотки, приведенным к первичной обмотке (к числу витков первичной обмотки). Теперь, разделив обе части уравнения (5.16) на  $w_1$ , получим:

$$I_1 + I_2' = I_0. \quad (5.18)$$

Уравнение (5.18), как и уравнение (5.16), носит приблизительный характер. Реактивная составляющая суммы векторов  $I_1$  и  $I_2'$  называется *намагничивающим током*, поскольку магнитный поток в магнитопроводе определяется именно реактивной составляющей тока. Намагничивающий ток приблизительно равен значению  $I_{0p}$  (см. рис. 5.3, а).

Для упрощения уравнений, удобства построения векторной диаграммы трансформатора и анализа происходящих в нем процессов удобно пользоваться приведенными значениями различных величин. Выполняя приведение к первичной обмотке величин, относящихся ко вторичной обмотке, условно полагают, что количество витков вторичной обмотки равно количеству витков первичной ( $w_2 = w_1$ ), но при этом *мощность трансформатора, потери мощности и фазовые углы сохраняются*.

Из условия равенства чисел витков следует, что приведенная ЭДС вторичной обмотки  $E_2'$  равна ЭДС первичной обмотки:

$$E_2' = E_1 = E_2 k = E_2 \frac{w_1}{w_2} \quad (5.19)$$

(вспомним, что в каждом витке первичной и вторичной обмотки индуцируется одна и та же ЭДС, а ЭДС всей обмотки пропорциональна числу ее витков, см. уравнения (4.5)).

Аналогичная связь с коэффициентом трансформации записывается для приведенного напряжения вторичной обмотки:

$$U'_2 = U_2 k, \quad (5.20)$$

но при этом приведенное напряжение вторичной обмотки не равно напряжению первичной обмотки (это пояснено далее при рассмотрении векторной диаграммы).

Выражение (5.17) дает приведенный ток вторичной обмотки. То же самое получается из условия равенства полной мощности приведенного и исходного трансформатора:

$$U'_2 I'_2 = U_2 I_2; \quad I'_2 = I_2 \frac{U_2}{U'_2}; \quad I_2 = I_2 \frac{I_2}{k}.$$

Приравнявая потери на джоулеву теплоту в активном сопротивлении вторичной обмотки приведенного и исходного трансформаторов, получим приведенное активное сопротивление вторичной обмотки:

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

С учетом формулы (5.17) можно записать

$$R'_2 = R_2 k^2. \quad (5.21)$$

Таким же образом связано приведенное индуктивное сопротивление рассеяния с исходной величиной. Действительно, индуктивное сопротивление, как и индуктивность, пропорционально квадрату числа витков, как известно из курса электротехники, тогда  $\frac{X'_2}{w_1^2} = \frac{X_2}{w_2^2}$ . Отсюда

$$X'_2 = X_2 k^2. \quad (5.22)$$

Запишем выражение приведенного напряжения вторичной обмотки на основании уравнения (5.14) с учетом зависимостей (5.17), (5.19)...(5.22):

$$\underline{U}'_2 = \underline{E}_1 - I_2 R_2 k - j I_2 X_2 k. \quad (5.23)$$

Как видим, приведенные падения напряжения на сопротивлениях вторичной обмотки отличаются от исходных падений напряжения умножением на коэффициент трансформации, так же как ЭДС вторичной обмотки и напряжение на ее зажимах.

**Векторная диаграмма нагруженного трансформатора.** Это диаграмма, показанная на рис. 5.4, построена на основании уравнений

(5.18), (5.15) и (5.23). Выбран случай активно-индуктивной нагрузки, когда ток вторичной обмотки (ток нагрузки) отстает по фазе от напряжения на вторичной обмотке на угол  $\varphi_2$ , значение которого лежит между  $0$  и  $90^\circ$ , и ток первичной обмотки отстает по фазе от приложенного напряжения на угол  $\varphi_1$ .

В случае емкостной нагрузки сила тока в обеих обмотках опережает напряжение, и вектор  $I_1$  будет располагаться слева от вектора  $\underline{U}_1$  при неизменном положении вектора  $I_0$ .

Значения токов  $I'_2$  и  $I_1$  изменяются с изменением нагрузки, но так, что их векторная сумма остается почти неизменной и равной  $I_0$ . При номинальной нагрузке значения токов в обмотках существенно больше тока холостого хода, так что векторы  $I'_2$  и  $I_1$  оказываются почти противоположно направленными.

Построение вектора  $\underline{U}_1$  выполняется аналогично тому, как это делалось в случае холостого хода (см. рис. 5.3, а). Ясно, что при работе на нагрузку падение напряжения  $I_1 R_1$  совпадает по фазе с током  $I_1$ , а не с током холостого хода.

При построении вектора  $\underline{U}'_2$  на основании уравнения (5.23) вычитание векторов заменено сложением с противоположными векторами. Видно, что приведенное напряжение вторичной обмотки не равно напряжению первичной, в то время как приведенная ЭДС вторичной обмотки равна электродвижущей силе первичной обмот-

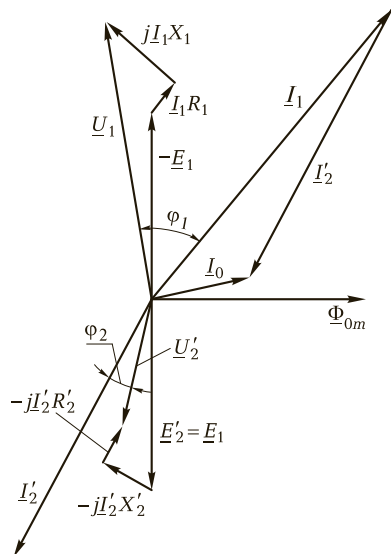


Рис. 5.4. Векторная диаграмма трансформатора в режиме нагрузки

ки. Правда, значения  $U'_2$  и  $U_1$  отличаются не намного, поскольку падения напряжения на сопротивлениях  $R_1, X_1, R_2, X_2$  невелики даже при номинальных токах (векторная диаграмма на рис. 5.4 построена без соблюдения масштабов).

**Схема замещения трансформатора в режиме нагрузки.**

На рис. 5.5, а показана принципиальная схема включения трансформатора к сети питания и нагрузке с полным сопротивлением  $Z_H$ , а на рис. 5.5, б дана схема замещения, основанная на уравнении (5.18), точнее, на его видоизменении:

$$I_1 = -I'_2 + I_0. \tag{5.24}$$

В соответствии с первым законом Кирхгофа это уравнение означает, что ток первичной обмотки рассматривается как ток в неразветвленной части цепи, а взятый со знаком минус приведенный ток вторичной обмотки и ток холостого хода являются токами в двух параллельных ветвях. На векторной диаграмме уравнение (5.24) можно проиллюстрировать, заменив вектор  $I'_2$  на противоположный ему по направлению вектор  $(-I'_2)$ . На рис. 5.5, б символом  $Z'_H$  обозначено приведенное полное сопротивление нагрузки, причем  $U'_2 = I'_2 Z'_H$ . Остальные обозначения были объяснены ранее. Показаны условные положительные направления токов и напряжений. Электромагнитная связь обмоток трансформатора заменена на схеме замещения электрической связью. Схема замещения трансформатора в режиме нагрузки, называемая *T-образной схемой*, отличается

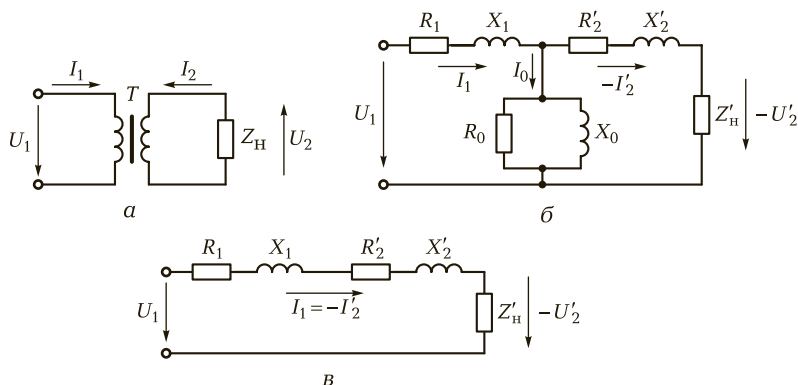


Рис. 5.5. Схемы включения трансформатора в режиме нагрузки: а — принципиальная; б — полная (Т-образная) схема замещения; в — упрощенная схема замещения

от схемы замещения для холостого хода (см. рис. 5.3, б) наличием дополнительной параллельной ветви.

Поскольку ток холостого хода мал по сравнению с токами обмоток, в отдельных случаях можно пользоваться *упрощенной* схемой замещения (рис. 5.5, в), в которой отсутствует ветвь тока холостого хода и приведенный ток вторичной обмотки считается равным по своему числовому значению току первичной обмотки. Фазы этих токов считаются противоположными, тогда векторы  $I_1$  и  $(-I_2)$  являются совпадающими.

### 5.3. ОПЫТ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

**Короткое замыкание трансформатора.** Короткое замыкание (КЗ), т. е. соединение зажимов его вторичной обмотки между собой проводником нулевого или малого сопротивления, является аварийным режимом, если на первичную обмотку подается номинальное напряжение. При этом по вторичной обмотке течет ток, который в начальный момент может превышать номинальное значение в 20—40 раз. В течение одного или нескольких периодов напряжения после КЗ происходит переходный процесс, по завершении которого ток короткого замыкания принимает установившееся значение, превышающее номинальное в 10—20 раз. При таких токах происходит значительное увеличение температуры проводов, что приводит к повреждению изоляции. Кроме того, в мощных трансформаторах возникают настолько большие электромагнитные силы между проводниками обмоток, что обмотки разрушаются, а магнитопровод деформируется. Силовые трансформаторы снабжаются быстродействующей защитой от короткого замыкания.

**Опыт короткого замыкания.** Он позволяет получить значения важных величин, характеризующих работу трансформатора, проводится при пониженном напряжении питания, при котором режим короткого замыкания не является аварийным. *Номинальным напряжением короткого замыкания*  $U_{к.ном}$  называется такое напряжение, при котором токи в обмотках принимают номинальные значения  $I_{1ном}$  и  $I_{2ном}$ .

Схема опыта короткого замыкания приведена на рис. 5.6. Напряжение сети подается на однофазный регулятор напряжения. В качестве первичной обмотки выбирается обмотка ВН (номинальное напряжение короткого замыкания этой обмотки ранее). Дальнейшее

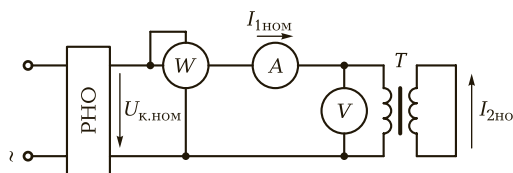


Рис. 5.6. Схема опыта короткого замыкания

рассмотрение соответствует именно тому случаю, когда на первичной обмотке установлено напряжение, равное  $U_{к.ном}$ . Ток вторичной обмотки в опыте короткого замыкания не измеряют, поскольку амперметр, обладая ненулевым сопротивлением, нарушил бы режим КЗ.

Ранее было выяснено, что магнитный поток  $\Phi_0$  в магнитопроводе трансформатора мало зависит от тока обмотки и пропорционален напряжению питания (см. подразд. 5.2). Номинальное напряжение короткого замыкания силовых трансформаторов составляет 5... 10 % от номинального напряжения питания; значит, в опыте короткого замыкания магнитный поток составляет 5... 10 % от номинального потока.

При построении упрощенной схемы замещения трансформатора в режиме нагрузки (см. рис. 5.5, в) принималось во внимание, что приведенный ток вторичной обмотки близок по значению к току первичной обмотки. Ввиду того что в опыте короткого замыкания магнитный поток и, соответственно, ток намагничивания существенно меньше, чем при номинальной нагрузке, упрощенная схема замещения оказывается еще более правомерной.

Введем обозначения:

$$R_k = R_1 + R_2'; X_k = X_1 + X_2'; Z_k = Z_1 + Z_2', \quad (5.25)$$

где  $R_k$ ,  $X_k$ ,  $Z_k$  называются соответственно активным, индуктивным и комплексным сопротивлением короткого замыкания трансформатора, а смысл прочих обозначений был разъяснен в подразд. 5.1 и 5.2.

Термин «сопротивление короткого замыкания» обусловлен тем, что в режиме КЗ цепь, подключенная к источнику питания, характеризуется только этим сопротивлением. При построении векторной диаграммы нагруженного трансформатора (см. рис. 5.4) приближенно можно принять:  $R_1 \approx R_2' \approx R_k/2$ ;  $X_1 \approx X_2' \approx X_k/2$ .

Схема замещения трансформатора в опыте короткого замыкания (рис. 5.7, а) построена на основе упрощенной схемы замещения (см. рис. 5.5, в) для случая нулевого сопротивления нагрузки с учетом обозначений (5.25).



Схеме замещения (см. рис. 5.7, а) соответствует уравнение

$$\underline{U}_{\text{к.ном}} = I_{\text{Iном}} \underline{Z}_{\text{к}} = I_{\text{Iном}} R_{\text{к}} + j I_{\text{Iном}} X_{\text{к}} = \underline{U}_{\text{а}} + \underline{U}_{\text{р}}, \quad (5.26)$$

где  $\underline{U}_{\text{а}}$  и  $\underline{U}_{\text{р}}$  — активная и реактивная составляющие номинального напряжения короткого замыкания соответственно (индекс «к.ном» в этих обозначениях не использован для краткости записи).

Очевидно, что  $U_{\text{к.ном}} = \sqrt{U_{\text{а}}^2 + U_{\text{р}}^2}$ .

Векторная диаграмма трансформатора для короткого замыкания (рис. 5.7, б) построена в соответствии с уравнением (5.26).

В опыте КЗ, как и в опыте холостого хода, полезная мощность равна нулю: в опыте ХХ ток нагрузки равен нулю (нагрузка просто отсутствует), а в опыте КЗ напряжение на нагрузке равно нулю, поскольку сопротивление нагрузки равно нулю. Таким образом, ваттметр, включенный в схему опыта короткого замыкания, измеряет мощность потерь. Потери в стали в этом опыте малы ввиду того, что мал магнитный поток в магнитопроводе. Поэтому мощность  $P_{\text{к}}$ , потребляемая трансформатором в опыте КЗ, расходуется, главным образом, на покрытие тепловых потерь в обмотках (потерь в меди).

Если по обмоткам текут номинальные токи, то мощность тепловых потерь

$$P_{\text{к.ном}} = I_{\text{Iном}}^2 R_1 + I_{\text{Iном}}^2 R_2' = I_{\text{Iном}}^2 R_{\text{к}} \quad (5.27)$$

(учтено, что приведенный ток вторичной обмотки практически равен току первичной обмотки). При изменении токов изменяются тепловые потери. Итак, потери в меди являются переменными потерями, зависящими от нагрузки.

**Определение параметров короткого замыкания.** Из опыта короткого замыкания определяют:

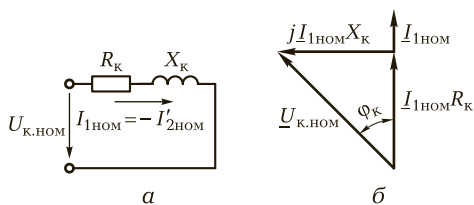


Рис. 5.7. Графические представления опыта короткого замыкания трансформатора:

а — схема замещения трансформатора; б — векторная диаграмма

- номинальное напряжение короткого замыкания  $U_{к.ном}$ : напряжение на выходе регулятора напряжения повышаются до тех пор, пока показание амперметра (см. рис. 5.6) не будет соответствовать номинальному току первичной обмотки;
- мощность потерь в меди  $P_{к.ном}$  при номинальном токе (по показанию ваттметра);
- активное сопротивление короткого замыкания  $R_k$ , зная мощность потерь в меди, на основании соотношения (5.27):

$$R_k = \frac{P_{к.ном}}{I_{ном}^2}; \quad (5.28)$$

- полное сопротивление короткого замыкания  $Z_k$  на основании закона Ома:

$$Z_k = \frac{U_{к.ном}}{I_{ном}}; \quad (5.29)$$

- индуктивное сопротивление короткого замыкания  $X_k$ :

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}. \quad (5.30)$$

Если опыт КЗ проводится с холодным трансформатором, то параметры короткого замыкания приводят к рабочей температуре  $75^\circ\text{C}$ . Сопротивление металла увеличивается с возрастанием температуры, и при  $75^\circ\text{C}$  активное сопротивление короткого замыкания становится равным

$$R_{к75} = R_k(1 + \alpha(75 - \theta)), \quad (5.31)$$

где  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления, показывающий относительное изменение электрического сопротивления материала при изменении температуры на  $1^\circ\text{C}$  (у меди и алюминия  $\alpha = 0,0041/^\circ\text{C}$ );  $\theta$  — температура,  $^\circ\text{C}$ , при которой проводится опыт КЗ.

Индуктивное сопротивление рассеяния, зависящее от числа витков обмотки, ее геометрических параметров и материала окружающей среды, через которую замыкаются силовые линии магнитного потока рассеяния, практически не зависит от температуры обмотки.

Полное сопротивление короткого замыкания, приведенное к температуре  $75^\circ\text{C}$ , рассчитывается по найденным значениям  $R_{к75}$  и  $X_k$ :

$$Z_{к75} = \sqrt{R_{к75}^2 + X_k^2}. \quad (5.32)$$

Номинальное напряжение короткого замыкания и его составляющие выражают обычно в процентах от номинального напряжения питания первичной обмотки. Эти величины, приведенные к температуре  $75\text{ }^\circ\text{C}$ , вычисляют по формулам:

$$u_{к75} = \frac{I_{\text{НОМ}} Z_{к75}}{U_{\text{НОМ}}} 100; \quad u_{а75} = \frac{I_{\text{НОМ}} R_{к75}}{U_{\text{НОМ}}} 100; \quad u_{р} = \frac{I_{\text{НОМ}} X_{к}}{U_{\text{НОМ}}} 100. \quad (5.33)$$

Коэффициент мощности в режиме короткого замыкания

$$\cos \varphi_{к75} = \frac{R_{к75}}{Z_{к75}}. \quad (5.34)$$

У трансформаторов малой мощности (до нескольких  $\text{kB} \cdot \text{A}$ ) активное сопротивление короткого замыкания  $R_{к75}$  больше индуктивного  $X_{к75}$ , главным образом ввиду малой площади сечения проводника. Соответственно, активная составляющая напряжения короткого замыкания  $U_a$  больше реактивной составляющей  $U_p$ . В этом случае угол сдвига фаз  $\varphi_k < 45^\circ$  и  $\cos \varphi_k > 0,707$ . Для трансформаторов мощностью сотни и тысячи киловольт-ампер справедливы противоположные неравенства.

Если в схеме опыта короткого замыкания (см. рис. 5.6) регулировать напряжение первичной обмотки от нуля до номинального напряжения короткого замыкания или до несколько большего значения, считывая при этом показания приборов, можно получить характеристики короткого замыкания трансформатора — зависимости тока короткого замыкания, мощности потерь и коэффициента мощности от напряжения на первичной обмотке.

#### 5.4. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ В ОПЫТАХ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И ХОЛОСТОГО ХОДА, НА СВОЙСТВА ТРАНСФОРМАТОРА

**Изменение напряжения трансформатора при работе на нагрузку.** Как известно из курса электротехники, напряжение  $U$  на зажимах источника питания, работающего на приемник электроэнергии (нагрузку), меньше напряжения  $U_x$  в режиме холостого хода на величину падения напряжения  $\Delta U$  на внутреннем сопротивлении  $r$  источника:  $U = U_x - \Delta U$ , причем  $\Delta U = Ir$ , где  $I$  — ток, текущий по приемнику и внутреннему сопротивлению. Напряжение  $U_x$  численно равно ЭДС источника. В режиме короткого замыкания напряжение равно нулю, и ток короткого замыкания  $I_k = E/r$ . Таким образом, внутреннее со-

противление источника является сопротивлением, определяющим ток в режиме короткого замыкания источника.

Напряжение  $U_2$  на зажимах вторичной обмотки трансформатора, работающего на нагрузку, может быть выражено аналогично напряжению на зажимах любого источника питания:

$$U_2 = U_{2\text{ном}} - \Delta U,$$

где  $U_{2\text{ном}}$  — номинальное напряжение вторичной обмотки, соответствующее режиму холостого хода (согласно выражению (5.2), оно совпадает по числовому значению с ЭДС вторичной обмотки  $E_2$ );  $\Delta U$  — изменение напряжения при работе на нагрузку.

Изменение напряжения при работе трансформатора на нагрузку обычно выражается в процентах от напряжения при холостом ходе:

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_{2\text{ном}}} 100 = \frac{U_{2\text{ном}} - U_2}{U_{2\text{ном}}} 100. \quad (5.35)$$

Напряжения вторичной обмотки можно заменить в этом выражении на величины, приведенные к первичной обмотке, поскольку отношение при этом не изменится.

Изменение напряжения  $\Delta u$  зависит от составляющих номинального напряжения короткого замыкания  $u_{a75}$  и  $u_p$  (см. выражения (5.33)); от характера нагрузки, т. е. от угла сдвига фаз  $\varphi_2$  между током и напряжением нагрузки; от значения тока нагрузки  $I_2$ , или, иными словами, от *коэффициента нагрузки*  $\beta$ , который определяется следующим образом:

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}} \approx \frac{I_1}{I_{1\text{ном}}}. \quad (5.36)$$

Выражение изменения напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора при его работе на нагрузку приведем без доказательства (оно может быть получено из анализа векторной диаграммы трансформатора):

$$\Delta u = \beta(u_a \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2) \quad (5.37)$$

(опущен индекс «75» в обозначении активной составляющей номинального напряжения короткого замыкания).

Можно показать, что изменение напряжения  $\Delta u$  принимает наибольшее значение при таком характере нагрузки, когда выполняется равенство  $\varphi_2 = \varphi_k$ , где  $\varphi_k$  — угол сдвига фаз между током и напряжением в опыте короткого замыкания, определяемый параметрами  $R_k$  и  $X_k$  (см. выражение (5.34)). Поскольку сопротивление  $X_k$  имеет индуктивный характер, то и значение  $\Delta u$  становится максимальным при активно-индуктивной внешней нагрузке.

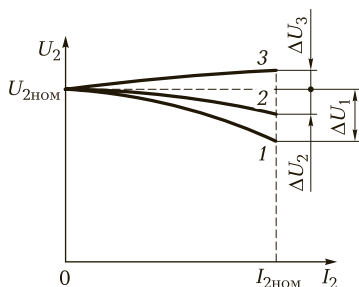


Рис. 5.8. Внешние характеристики трансформатора при различной нагрузке:

1 — активно-индуктивной; 2 — активной; 3 — активно-емкостной

При чисто активной нагрузке  $\varphi_2 = 0$ ,  $\cos\varphi_2 = 1$ ;  $\sin\varphi_2 = 0$  и  $\Delta u = \beta u_a$ , т. е. в этом случае изменение напряжения определяется активной составляющей напряжения короткого замыкания.

При активно-емкостной нагрузке, когда угол  $\varphi_2$  и  $\sin\varphi_2$  отрицательны, изменение напряжения  $\Delta u$  становится меньше значения  $\beta u_a$ . При некотором значении угла  $\varphi_2$  изменение напряжения становится равным нулю, т. е. напряжение на вторичной обмотке при такой активно-емкостной нагрузке равно напряжению при холостом ходе. Наконец, при больших по модулю значениях угла  $\varphi_2$  изменение напряжения  $\Delta u$  отрицательно, что означает увеличение напряжения на зажимах трансформатора при увеличении тока нагрузки.

Активная и реактивная составляющие номинального напряжения короткого замыкания определяются по результатам опыта КЗ. Зная значения коэффициента нагрузки  $\beta$  и коэффициента мощности нагрузки  $\cos\varphi_2$ , можно определить по формуле (5.37) изменение напряжения  $\Delta u$ . Тогда, пользуясь формулой (5.35) и не прибегая к экспериментальным испытаниям, можно найти напряжение на вторичной обмотке  $U_2$  при заданной нагрузке.

На рис. 5.8 показаны внешние характеристики трансформатора при различных характерах нагрузки. Внешняя характеристика трансформатора, как и генератора, — это зависимость напряжения на выходных зажимах (в данном случае — на зажимах вторичной обмотки) от тока нагрузки  $U_2(I_2)$ . Взаимное расположение внешних характеристик при активно-индуктивной 1, активной 2 и активно-емкостной 3 нагрузках соответствует сказанному ранее о различии значений  $\Delta u$  при этих видах нагрузки.

**Потери энергии трансформатора.** Ранее было показано (см. подразд. 5.1 и 5.3), что потери, имеющие место при трансформировании

электроэнергии, могут быть экспериментально определены в опытах холостого хода и короткого замыкания.

В опыте холостого хода определяется мощность *магнитных потерь*  $P_0$ , связанных с периодическим перемагничиванием магнитопровода. Перемагничивание вызывает два вида магнитных потерь: потери от гистерезиса, обусловленные затратами энергии на преодоление остаточного намагничивания магнитопровода, и потери от вихревых токов в магнитопроводе. Магнитные потери увеличиваются с возрастанием частоты переменного тока, причем мощность потерь от гистерезиса пропорциональна первой степени частоты, а потери от вихревых токов пропорциональны квадрату частоты. При неизменном напряжении питания и неизменной частоте тока мощность магнитных потерь практически не зависит от тока нагрузки. Для уменьшения магнитных потерь магнитопровод выполняется из изолированных тонких листов электротехнической стали, характеризующейся узкой петлей гистерезиса (магнитомягкий материал) и малой остаточной намагниченностью.

В опыте короткого замыкания определяется мощность *электрических потерь* в обмотках трансформатора  $P_{к.ном}$  при номинальном токе нагрузке (см. выражение (5.27)). Мощность электрических потерь трансформатора, работающего на нагрузку, изменяется пропорционально квадрату тока нагрузки и, значит, пропорционально квадрату коэффициента нагрузки  $\beta$ , определяемого выражением (5.36):

$$P_k = \beta^2 P_{к.ном}. \quad (5.38)$$

**Коэффициент полезного действия трансформатора.** Определяется как отношение активной мощности  $P_2$ , передаваемой приемнику электроэнергии, к активной мощности  $P_1$ , потребляемой трансформатором из сети. Расчетные формулы КПД трансформатора и генератора аналогичны (см. выражение (2.2)), но полезная мощность трансформатора выражается как  $P_2 = S_2 \cos \varphi_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$ , где  $S_2 = U_2 I_2$  — полная мощность вторичной цепи. При постоянном значении напряжения, подаваемого на первичную обмотку трансформатора ( $U_1 = U_{1ном}$ ), напряжение на вторичной обмотке изменяется незначительно ( $U_2 \approx U_{2ном}$ ), поэтому мощность, передаваемая во вторичную цепь, пропорциональна току нагрузки  $I_2$  и, значит, коэффициенту нагрузки  $\beta$ :

$$P_2 = \beta S_{2ном} \cos \varphi_2 = \beta U_{2ном} I_{2ном} \cos \varphi_2.$$

Суммарные потери трансформатора  $\Sigma P$ , в соответствии с изложенным ранее, складываются из постоянных магнитных и переменных электрических потерь:

$$\Sigma P = P_0 + \beta^2 P_{\text{к.ном.}}$$

Таким образом, выражение КПД трансформатора записывается следующим образом:

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{\text{к.ном}}},$$

(5.39)

или

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{\text{к.ном}}} 100.$$

Первая из приведенных формул (5.39) выражает КПД в долях единицы, вторая — в процентах.

Потери трансформаторов невелики. Так, у трансформаторов малой мощности (до 1 кВ·А) номинальный КПД составляет 85 ... 95 %, а у трансформаторов большей мощности — 95 ... 99,5 %.

При отсутствии нагрузки ( $I_2 = 0$ ;  $\beta = 0$ ) КПД равен нулю. С увеличением нагрузки КПД увеличивается и при некотором значении  $\beta = \beta_{\text{max}}$  проходит через максимум. Значение  $\beta_{\text{max}}$  может быть определено путем нахождения экстремума функции  $\eta = f(\beta)$ . Для этого нужно найти производную данной функции по переменной  $\beta$  и приравнять ее к нулю. В результате такой операции получится равенство

$$\beta_{\text{max}}^2 P_{\text{к.ном}} = P_0. \quad (5.40)$$

Таким образом, *КПД трансформатора максимален при такой нагрузке, при которой мощность переменных электрических потерь  $P_{\text{к}} = \beta_{\text{max}}^2 P_{\text{к.ном}}$  становится равной мощности постоянных магнитных потерь  $P_0$* . Из выражения (5.40) находим значение

$$\beta_{\text{max}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{к.ном}}}}. \quad (5.41)$$

Если трансформатор постоянно работает при номинальной нагрузке, то желательно получить максимальный КПД при номинальном токе (в этом случае  $\beta_{\text{max}} = 1$ ), а если обычным является режим недогрузки (ток вторичной цепи меньше номинального), то предпочтительно иметь  $\beta_{\text{max}} < 1$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. С какой целью выполняется опыт холостого хода трансформатора?

2. Чем объясняется наличие сдвига фаз между магнитным потоком трансформатора и током холостого хода?
3. Запишите и объясните уравнения напряжения первичной и вторичной обмоток трансформатора.
4. Начертите и объясните схему замещения трансформатора в режиме холостого хода.
5. Какая мощность определяется в опыте холостого хода трансформатора?
6. Запишите уравнения напряжения первичной и вторичной обмоток трансформатора при работе на нагрузку. Объясните их отличия от уравнений, соответствующих режиму холостого хода.
7. Объясните приблизительную неизменность магнитного потока трансформатора при изменении токов в обмотках.
8. Запишите и прокомментируйте уравнение МДС трансформатора.
9. С какой целью выполняется приведение величин вторичной обмотки к первичной обмотке? Какова связь между приведенными значениями тока, напряжения, ЭДС и сопротивлений вторичной обмотки и исходными значениями этих величин?
10. Начертите полную и упрощенную схемы замещения трансформатора в режиме нагрузки.
11. Как проводится опыт короткого замыкания трансформатора? Что называется номинальным напряжением короткого замыкания?
12. Начертите и прокомментируйте схему замещения трансформатора в режиме короткого замыкания?
13. Какие сопротивления и мощность определяются из опыта короткого замыкания?
14. Назовите особенности зависимости изменения напряжения на вторичной обмотке от тока нагрузки при активной, индуктивной и емкостной нагрузках.
15. Как из опытных данных определяется коэффициент полезного действия трансформатора?



# ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ И ИХ ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА

## 6.1. КОНСТРУКЦИИ СИЛОВЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**Трансформаторная группа и трехфазный трансформатор.** Для трансформирования электроэнергии в сетях трехфазного тока применяются трансформаторные группы, состоящие из трех однофазных трансформаторов, а также собственно трехфазные трансформаторы.

*Трансформаторные группы* (групповые трансформаторы) применяются только при очень большой мощности (более 60 МВ·А). Преимущество группового трансформатора перед трехфазным, выполненным в виде одного аппарата, состоит в том, что каждый однофазный трансформатор, входящий в группу, имеет меньшие габаритные размеры и массу, чем один трехфазный трансформатор, сконструированный на общую мощность группы. Благодаря этому групповой трансформатор легче транспортировать. Кроме того, если используется трансформаторная группа, то в качестве резерва достаточно иметь один однофазный трансформатор. Однако трансформаторная группа имеет более высокую стоимость по сравнению с трехфазным трансформатором, рассчитанным на ту же мощность, имеет большие общие габаритные размеры и меньший КПД.

Конструкция трехфазного трансформатора, выполненного в виде одного аппарата, схематически показана на рис. 4.1, г. Его магнитопровод содержит три стержня, на каждом из которых помещаются обмотки высшего и низшего напряжения, принадлежащие одной фазе. Дополнительный стержень, по которому замыкались бы магнитные потоки отдельных фаз, не требуется, поскольку поток этого стержня был бы равен нулю. Действительно, потоки фаз обмотки смещены один относительно другого по фазе на угол  $120^\circ$ , и суммарный поток равен нулю:

$$\underline{\Phi}_A + \underline{\Phi}_B + \underline{\Phi}_C = 0.$$

При этом намагничивающий ток фазы *B* (см. подразд. 5.2), обмотки которой помещены на среднем стержне, меньше намагничивающих токов двух других фаз, поскольку длина магнитных силовых линий этой фазы меньше, чем двух крайних фаз. Действительно, силовые линии фаз *A* и *C* проходят по соответствующим стержням и по половинам верхнего и нижнего ярма, а силовые линии фазы *B* проходят только по стержню. Меньшей длине силовых линий соответствует меньшее магнитное сопротивление, и значит, для создания данного магнитного потока требуется меньший ток намагничивания. Как уже отмечалось ранее (подразд. 5.2), намагничивающий ток почти равен току холостого хода, поэтому ток холостого хода фазы *B* оказывается меньше токов холостого хода двух других фаз. В качестве значения тока холостого хода трехфазного трансформатора  $I_0$  принимается среднее арифметическое токов трех фаз:

$$I_0 = \frac{I_{0a} + I_{0b} + I_{0c}}{3}. \quad (6.1)$$

**Трансформатор с масляным охлаждением (масляный трансформатор).** Это основной вид силового трансформатора. Его магнитопровод с обмотками помещен в бак с трансформаторным (минеральным нефтяным) маслом, которое выполняет две функции. Во-первых, масло является изолирующей средой, имеющей более высокую диэ-

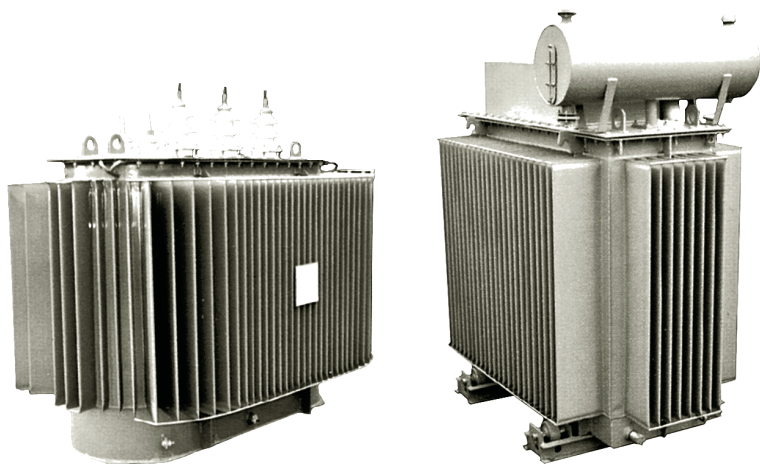


Рис. 6.1. Силовые масляные трансформаторы

лектрическую прочность, чем воздух. Это означает, что электрический пробой трансформаторного масла возникает при более высокой напряженности электрического поля, чем пробой воздуха. Учитывая это обстоятельство, появляется возможность уменьшить изоляционные расстояния между токоведущими и заземленными частями, а также между обмотками. Во-вторых, трансформаторное масло обладает лучшей охлаждающей способностью по сравнению с воздухом. Для передачи данной мощности это позволяет уменьшить расход материалов за счет уменьшения сечений обмоточного провода и магнитопровода (необходимые сечения определяются условиями нагревания).

Теплообмен масла с окружающей средой происходит через стенки бака. Баки трансформаторов мощностью до 30 кВ·А выполняются гладкими. При больших мощностях для повышения интенсивности охлаждения стенки бака выполняют ребристыми (рис. 6.1) или трубчатыми. В мощных трансформаторах применяют форсированное охлаждение масла: масло из бака откачивается насосом, прогоняется через водяной или воздушный теплообменник и возвращается в бак.

При работе трансформатора обмотки и магнитопровод нагреваются и нагревают масло, которое при этом расширяется. По этой причине необходимо, чтобы над маслом оставался свободный объем. Однако если этот объем оставить над всей поверхностью бака, то площадь соприкосновения масла с воздухом будет большой, что приведет к интенсивному окислению масла и, вследствие этого, к ухудшению его свойств. Для существенного уменьшения свободной поверхности масла над баком устанавливают **маслорасширитель**, представляющий собой стальной цилиндрический резервуар, соединенный с баком трансформатора трубой (см. нижнюю часть рис. 6.1). Объем маслорасширителя составляет приблизительно 10 % от объема бака. Сверху на маслорасширителе имеется маслоналивная горловина, через которую бак трансформатора заполняется маслом. Количество масла должно быть таким, чтобы при возможных колебаниях температуры оно целиком заполняло бак и уровень масла изменялся только в маслорасширителе. Для контроля уровня масла в расширителе предусмотрено узкое вертикальное окно, закрытое стеклом, — **маслоуказатель**.

Нагревание трансформатора в процессе работы приводит не только к увеличению объема масла. При всяком чрезмерном нагреве какой-либо части трансформатора начинается разложение изоляции и масла. В результате появляются газообразные продукты распада. Защита от чрезмерных повышений температуры внутри трансфор-

матора (тепловая защита) осуществляется при помощи газового реле, которое устанавливается в трубе, соединяющей бак с масло-расширителем. Основными частями газового реле являются два поплавка, укрепленные на держателях, которые способны перемещаться в вертикальной плоскости, и контактная система цепей управления. Первый поплавок установлен в верхней части газового реле под горизонтальным фланцем. При нормальной работе трансформатора реле целиком заполнено маслом, и поплавки находятся в верхнем положении. На держателе вблизи поплавка укреплен постоянный магнит, который притягивает к себе пластину подвижного контакта; последний при этом обеспечивает замкнутое состояние цепи управления *сигнализацией предупреждения* (цепь управления устроена так, что сигнализация включается при размыкании подвижного и неподвижного контактов. Такое схемное решение повышает надежность работы реле). Выделяющийся газ скапливается в верхней части реле под горизонтальным фланцем и понижает уровень масла. Вследствие этого первый поплавок вместе с магнитом опускается. Контакты размыкаются, и сигнализация предупреждения срабатывает. Трансформатор при этом не отключается. В случае если процесс выделения газа носит более интенсивный характер, уровень масла понижается еще больше, что приводит к опусканию второго, нижнего, поплавка и к размыканию контактов цепи управления, обеспечивающей *аварийное отключение трансформатора*.

При слишком интенсивном образовании газов, которое может произойти, например, при коротком замыкании, давление в герметичном баке трансформатора может возрасти настолько, что бак будет деформирован. Для предотвращения деформации на трансформаторы мощностью 1 000 кВ·А и выше устанавливают в х л о п н у ю т р у б у. Внизу труба крепится к крышке бака и имеет с ним сообщение. Сверху она закрывается стеклянной пластиной. При интенсивном газообразовании пластина выдавливается раньше, чем произойдет повреждение бака.

Контроль температуры масла производится термометрами различного типа. В трансформаторах мощностью до 1 000 кВ·А используются ртутные термометры, устанавливаемые на крышке бака в металлической оправе. Трансформаторы мощностью более 1 000 кВ·А и выше имеют термометрический сигнализатор, укрепляемый на боковой части бака. Трехфазные трансформаторы мощностью от 7500 кВ·А и выше и однофазные трансформаторы мощностью 3000 кВ·А и выше должны иметь дистанционный измеритель температуры масла для передачи результатов измерения на щит управления.

Для непрерывной очистки масла от продуктов окисления, снижающих его изоляционные свойства, трансформатор снабжается термосифонным фильтром, который представляет собой вертикальный цилиндр, сообщающийся с баком трансформатора через трубы. Термосифонный фильтр заполнен поглощающим веществом — сорбентом (силикагелем). В нем происходит *термодиффузная циркуляция масла* в направлении сверху вниз (термодиффузия — это диффузия, обусловленная наличием в среде перепада температуры).

В адсорбере, в отличие от термосифонного фильтра, циркуляция масла осуществляется принудительно, с помощью масляного насоса, перекачивающего масло снизу вверх. Эффективность очистки масла определяется скоростью потока масла и свойствами сорбента.

Начала и концы обмоток трансформатора выводятся из бака наружу. Для этого используются проходные фарфоровые изоляторы, внутри которых имеется токоведущий медный стержень. Изоляторы укрепляются на крышке бака и называются вводами высшего и низшего напряжения. Вводы трансформаторов, устанавливаемых внутри помещения, обычно имеют гладкую внешнюю поверхность; вводы трансформаторов, устанавливаемых снаружи, — ребристую (см. рис. 6.1, верхняя часть).

**Регулирование коэффициента трансформации.** Необходимость регулирования коэффициента трансформации обусловлена, во-первых, тем, что напряжения в разных точках линии электропередачи, куда включаются трансформаторы, различны. Во-вторых, напряжение в любом месте линии изменяется при колебаниях нагрузки. При этом напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора должно быть номинальным или незначительно отличаться от него. Для регулирования коэффициента трансформации изменяют число витков обмотки ВН, для чего внутри бака размещается переключатель. Рукоятка переключателя выводится на крышку или стенку бака трансформатора.

Переключение осуществляется между регулировочными ответвлениями обмотки. Если предусмотрено три ответвления от фазы обмотки, то среднее ответвление соответствует номинальному коэффициенту трансформации, а два других — коэффициентам трансформации, отличающимся от номинального на  $\pm 5\%$ . Может быть предусмотрено и большее число ответвлений, обеспечивающее меньший шаг между значениями коэффициента трансформации.

Переключение при отключенном от сети трансформаторе называется *переключением без возбуждения* (ПБВ). Переключение без

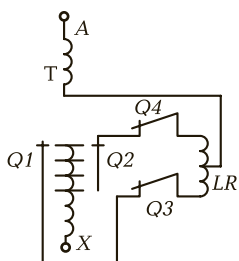


Рис. 6.2. Схема переключения трансформатора под нагрузкой

отключения трансформатора называется *регулированием под нагрузкой* (РПН). Последнее выполняется так, чтобы *ни в какой момент времени трансформатор не оказался отключенным от сети* (отсоединение от сети при работе под нагрузкой привело бы к возникновению электрической дуги).

На рис. 6.2 показана одна фаза обмотки высшего напряжения трансформатора Т со схемой РПН. Начало и конец фазы обмотки обозначены соответственно А и Х. Фаза обмотки разделена на две части. От витков нижней части сделаны ответвления, соответствующие разным коэффициентам трансформации. В схему включены: переключатели Q1 и Q2, контакторы Q3 и Q4 с размыкающими контактами, реактор LR (реактор — это устройство, обладающее большим индуктивным сопротивлением и применяемое, в частности, для ограничения токов).

При работе трансформатора контакты переключателей Q1 и Q2 находятся на одном и том же ответвлении обмотки. При этом ток течет по двум частям фазы обмотки и по обоим параллельным ветвям, содержащим контакты переключателей и контакторов. Переключение на соседнее ответвление осуществляется в следующем порядке:

- контакты контактора Q3 размыкаются;
- подвижный контакт переключателя Q1, который теперь находится в обесточенной ветви, переводится на соседнее (на схеме — расположенное ниже) ответвление;
- контакты контактора Q3 замыкаются. В этом положении часть обмотки, заключенная между контактами переключателей Q1 и Q2, оказывается в замкнутой цепи переключающего устройства. Однако ток в этой цепи ограничивается сопротивлением реактора LR и не достигает большого значения;

- размыкаются контакты контактора  $Q4$ ;
- подвижный контакт переключателя  $Q2$  переводится на ответвление, на котором уже находится контакт переключателя  $Q1$ ;
- контакты контактора  $Q4$  замыкаются.

Описанная процедура регулирования под напряжением осуществляется автоматически или дистанционно со щита управления.

## 6.2. ИСПЫТАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ПАРАМЕТРОВ

Схемы опытов холостого хода и короткого замыкания трехфазного трансформатора показаны на рис. 6.3 (сравните данные схемы со схемами, показанными на рис. 5.1 и 5.5, а).

Напряжение трехфазной сети подается на трехфазный регулятор напряжения (РНТ), который представляет собой регулируемый автотрансформатор (см. подразд. 7.1).

Вольтметры, как показано на схемах, присоединены к фазам обмоток трансформатора для измерения *фазных напряжений*  $U_{1ф}$ ,  $U_{2ф}$ . В таком случае по результатам опытов холостого хода и короткого

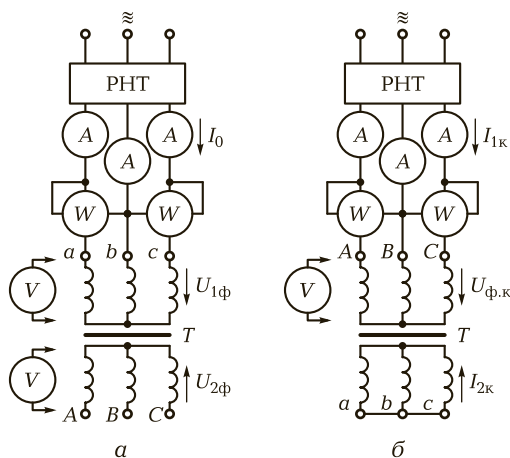


Рис. 6.3. Схемы испытания трехфазного трансформатора:  
а — опыт холостого хода; б — опыт короткого замыкания

замыкания могут быть построены векторные диаграммы и схемы замещения для отдельных фаз трехфазного трансформатора, соответствующие диаграммам и схемам однофазного трансформатора (см. рис. 5.3, 5.4, 5.5, б и в, 5.7). Однако отметим, что в технической документации при указании на номинальные значения напряжения и тока подразумевают действующие значения линейного напряжения и линейного тока.

Для измерения мощности потерь используется схема двух ваттметров, сумма показаний которых, как можно доказать, дает мощность трехфазной цепи. По той же схеме соединяются элементы трехфазного двухэлементного ваттметра.

Ток холостого хода  $I_0$  определяется по показаниям трех амперметров согласно формуле (6.1). Аналогично определяется ток в опыте короткого замыкания.

Коэффициент трансформации трансформатора определяется из опыта холостого хода. Для трехфазного трансформатора различают конструктивный и эксплуатационный коэффициенты трансформации.

*Конструктивным коэффициентом трансформации  $k_{\text{кон}}$*  называется отношение чисел витков фазы обмотки ВН и фазы обмотки НН:

$$k_{\text{кон}} = \frac{w_{\text{ВН}}}{w_{\text{НН}}} \approx \frac{U_{\text{фВН}}}{U_{\text{фНН}}}. \quad (6.2)$$

Выражение (6.2) совпадает с выражением (4.6) для однофазного трансформатора.

*Эксплуатационным коэффициентом трансформации  $k_{\text{экс}}$*  называется отношение линейных напряжений (напряжений между линейными проводами):

$$k_{\text{экс}} = \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}}. \quad (6.3)$$

Значение  $k_{\text{экс}}$  зависит от способа соединения обмоток ВН и НН:

- если обмотки ВН и НН соединены одинаково, т. е. обе звездой, как на рис. 6.3, или обе треугольником, то  $k_{\text{экс}} = k_{\text{кон}}$  (в схеме треугольника конец первой фазы обмотки соединен с началом второй фазы, конец второй фазы — с началом третьей, конец третьей — с началом первой; к точкам соединения фаз обмотки присоединяются провода трехпроводной трехфазной линии);
- если обмотка ВН соединена звездой, а обмотка НН треугольником, то  $U_{\text{ВН}} = \sqrt{3}U_{\text{фВН}}$ ;  $U_{\text{НН}} = U_{\text{фНН}}$ , и тогда  $k_{\text{экс}} = \sqrt{3}k_{\text{кон}}$ ;



- если обмотка ВН соединена треугольником, а обмотка НН звездой, то  $k_{\text{экс}} = k_{\text{кон}} / \sqrt{3}$ .

Коэффициент мощности трехфазного трансформатора в опыте холостого хода находят по экспериментальным данным следующим образом:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P'_0 + P''_0}{3U_{1\text{ф}}I_0} = \frac{P_0}{3U_{1\text{ф}}I_0}, \quad (6.4)$$

где  $P'_0$  и  $P''_0$  — показания однофазных ваттметров;  $P_0$  — сумма показаний однофазных ваттметров или показание двухэлементного ваттметра. Аналогично находят коэффициент мощности в опыте короткого замыкания.

*Номинальная мощность* трехфазного трансформатора связана с номинальными (линейными) токами и напряжениями следующим образом:

$$S_{\text{ном}} = \sqrt{3}U_{1\text{ном}}I_{1\text{ном}} \approx \sqrt{3}U_{2\text{ном}}I_{2\text{ном}}, \quad (6.5)$$

что справедливо как при соединении обмотки по схеме звезды, так и при соединении ее по схеме треугольника. Это следует из соотношений между линейными и фазными напряжениями и токами, известными из курса электротехники: при соединении *звездой* —  $U_1 = \sqrt{3}U_{1\text{ф}}$ ;  $I_1 = I_{1\text{ф}}$ ; при соединении *треугольником* —  $U_1 = U_{1\text{ф}}$ ;  $I_1 = \sqrt{3}I_{1\text{ф}}$ .

Уравнения напряжений, токов и МДС, приведенные в подразд. 5.2 для однофазного трансформатора, справедливы для каждой фазы трехфазного трансформатора. Параметры отдельной фазы трехфазного трансформатора (сопротивления, изменение напряжения при изменении нагрузки) находят по тем же формулам, что и параметры однофазного трансформатора.

### 6.3. ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЙ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**Схемы соединения обмоток.** В подразд. 6.2 упоминалось о соединении между собой обмоток трансформаторов по схемам звезды и треугольника. Соединение по *схеме звезды* обозначается  $Y$ , а соединение по *схеме треугольника* —  $\Delta$ . В специальных случаях, в частности, в трансформаторах, применяемых в сложномостовых схемах выпрямления, применяют соединение обмоток *зигзагом* (рис. 6.4). Отдельная фаза обмотки, соединенной зигзагом, состоит из двух

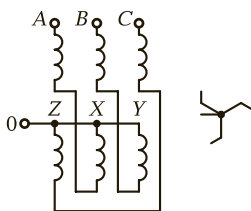


Рис. 6.4. Схема соединения обмотки зигзагом и ее условное обозначение

частей (катушек), находящихся на разных стержнях магнитопровода и соединенных встречно. Вектор ЭДС отдельной фазы такой обмотки определяется как разность векторов ЭДС двух катушек этой фазы. Из рассмотрения векторной диаграммы обмотки можно установить, что ЭДС катушек сдвинуты по фазе одна относительно другой на угол  $120^\circ$ . В этом случае действующее значение ЭДС фазы обмотки, соединенной зигзагом, оказывается больше, чем ЭДС одной катушки, в  $\sqrt{3}$  раз (если две катушки содержат равное число витков). Для сравнения: если фазы обмотки трансформатора соединены звездой или треугольником и если одну фазу обмотки представить состоящий из двух одинаковых катушек, то ЭДС фазы будет больше, чем ЭДС катушки, в 2 раза.

**Группы соединения обмоток.** При параллельной работе трансформаторов (см. подразд. 6.4) важны не только схемы соединения обмоток отдельных трансформаторов, но и так называемые *группы соединения*. В понятие группы соединения обмоток входят:

1) схемы соединения обмоток ВН и НН с указанием наличия вывода от общей точки в случае соединения обмотки звездой или зигзагом;

2) угол сдвига фаз между линейной ЭДС обмотки ВН ( $E_{AB}$ ) и соответствующей линейной ЭДС обмотки низшего напряжения ( $E_{ab}$ ). На векторной диаграмме этот угол измеряется *по часовой стрелке* от вектора  $E_{AB}$  к вектору  $E_{ab}$ .

Минимальное различие между углами сдвига фаз линейных ЭДС, соответствующих разным группам соединения, составляет  $30^\circ$ . Именно этот угол принимается за единицу измерения угла при определении группы соединения ( $30^\circ$  — это угол, на который поворачивается часовая стрелка за один час). Таким образом, если угол сдвига фаз между ЭДС  $E_{AB}$  и  $E_{ab}$  равен  $30^\circ$ , то трансформатор принадлежит группе соединения 1, если этот угол равен  $60^\circ$  — группе 2 и т. д.

Группы соединения обмоток трансформаторов зависят:

- от схем соединения обмоток ВН и НН;
- обозначений (маркировки) зажимов обмоток;
- направления намотки.

При соединении обмоток по схеме звезда—звезда может быть получена любая четная группа: 0, 2, 4, 6, 8, 10, а при соединении по схеме звезда—треугольник или треугольник—звезда — любая нечетная группа: 1, 3, 5, 7, 9, 11.

На рис. 6.5 показаны некоторые схемы соединения обмоток трансформаторов, соответствующие разным группам, а также векторные диаграммы, на которых видны углы между векторами линейных ЭДС.

На схемах (см. рис. 6.5) указаны условные положительные направления ЭДС. Для каждой схемы приведены векторные диаграммы ЭДС обмоток ВН и НН. Здесь, как и на топографических диаграммах напряжений, совпадение начал или концов различных векторов означает равенство потенциалов соответствующих точек схемы. В частности, поскольку на схемах 1 и 2 нижние зажимы обмоток соединены между собой, и поэтому имеют один и тот же потенциал, то и на диаграммах начала векторов ЭДС находятся в одной и той же точке. На этих диаграммах, как и на схемах, можно указать обозначения зажимов трансформатора. Конец вектора ЭДС, как и конец вектора напряжения на топографической диаграмме, во всех случаях указывает первую букву в обозначении вектора (например, концом вектора  $\underline{E}_{AB}$  является точка А). Именно в этом случае действия с векторами, выполненные по известным из геометрии правилам, приведут к правильным результатам.

На третьей диаграмме, относящейся к каждой схеме, совмещены начала векторов линейных ЭДС обмоток ВН и НН, чтобы можно было измерить угол между ними, по которому определяется число группы соединения.

На схеме 1 способы соединения и маркировка зажимов обмоток ВН и НН аналогичны, поэтому сдвиг фаз между ЭДС  $\underline{E}_{AB}$  и  $\underline{E}_{ab}$  равен нулю, что соответствует группе соединения 0.

На схеме 2 в обмотке НН перепутана маркировка зажимов. В результате ЭДС  $\underline{E}_a$  оказалась совпадающей по фазе с ЭДС  $\underline{E}_B$ , а ЭДС  $\underline{E}_b$  с ЭДС  $\underline{E}_C$ . Линейная ЭДС  $\underline{E}_{ab}$  при этом отстает по фазе от ЭДС  $\underline{E}_{AB}$  на угол  $120^\circ$ , что соответствует группе соединения  $120^\circ/30^\circ = 4$ .

На схеме 3 верхний зажим фазы *a* обмотки НН соединен с нижним зажимом фазы *c*, следовательно, потенциалы этих зажимов одинаковы. Это отражается на диаграмме обмотки НН: конец вектора  $\underline{E}_a$  и начало вектора  $\underline{E}_c$  находятся в одной точке. При этом на

№ схемы	Схема соединения обмоток	Диаграммы векторов ЭДС	Группа
1			$\Upsilon/\Upsilon - 0$
2			$\Upsilon/\Upsilon - 4$
3			$\Upsilon/\Delta - 1$
4			$\Upsilon/\Delta - 11$

Рис. 6.5. Некоторые схемы и группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов

правления векторов ЭДС обмотки НН такие же, как и для схемы 1, поскольку разности фаз между ЭДС те же самые. Вектор линейной ЭДС  $\underline{E}_{ab}$ , как и на прочих топографических диаграммах, имеет начало в точке  $b$  и конец в точке  $a$ . На диаграмме для схемы 3 вектор  $\underline{E}_{ab}$  совпадает с вектором  $\underline{E}_a$ . Угол между векторами  $\underline{E}_{AB}$  и  $\underline{E}_{ab}$  равен  $30^\circ$ , что соответствует группе соединения 1.

На схеме 4 верхний зажим фазы  $a$  обмотки НН соединен с нижним зажимом фазы  $b$ , поэтому на диаграмме конец вектора  $\underline{E}_a$  со-

вмещен с началом вектора  $\underline{E}_b$  при сохранении прежних направлений векторов. Вектор  $\underline{E}_{ab}$  оказывается равным по модулю, но противоположным по направлению вектору  $\underline{E}_b$ . Учитывая принятое направление отсчета угла между векторами линейных ЭДС обмоток ВН и НН, находим, что этот угол равен  $330^\circ$ , а группа соединения 11.

Стандартными являются следующие группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов:  $Y/Y_0 — 0$ ;  $Y/\Delta — 11$ ;  $Y_0/\Delta — 11$ ;  $\Delta/Y_0 — 11$ , где символ  $Y_0$  обозначает схему звезды с выведенной общей точкой (звезда с нулем). Чаще всего обмотка ВН соединяется звездой, поскольку в этом случае при данной линейной ЭДС фазная ЭДС меньше, чем при соединении треугольником. Соответственно меньшим будет число витков фазы обмотки, и тогда изоляция выполняется проще. Обмотка НН чаще всего соединяется треугольником, поскольку эта схема менее чувствительна к несимметричности обмотки. К стандартным относят также группу звезда — зигзаг — 11 (при этом обмотка НН имеет выведенную общую точку).

Для однофазного трансформатора возможны только две группы соединения обмоток:  $I/I — 0$  и  $I/I — 6$ . В первом случае между ЭДС обмоток ВН и НН сдвиг фаз равен нулю, а во втором случае —  $180^\circ$ .

Определение групп соединения обмоток трансформаторов осуществляется следующими методами:

- метод фазометра — непосредственное измерение разности фаз фазометром, лучше всего со шкалой на  $360^\circ$  (применяется при сравнительно небольших мощностях и напряжениях);
- графический метод — на основе построения топографической диаграммы по измеренным значениям напряжений между определенными зажимами трансформатора;
- расчетный метод — также по измеренным значениям напряжений.

Поскольку в методах фазометра и графическом измерительная часть одна и та же, их можно объединить под общим названием *метод вольтметра*.

#### **Графический метод определения группы соединения обмоток.**

Состоит из следующих этапов:

- соединяют зажим А обмотки ВН с зажимом а обмотки НН с целью обеспечения равенства потенциалов этих зажимов;
- к обмотке ВН подводят трехфазное напряжение пониженного значения;

- вольтметром измеряют напряжения  $U_{AB}$ ,  $U_{bB}$ ,  $U_{bC}$ ,  $U_{cB}$ ,  $U_{cC}$ , которые численно практически равны соответствующим ЭДС;
- по измеренным значениям строят диаграмму векторов ЭДС;
- на диаграмме измеряют угол, определяющий группу соединения.

Рассмотрим способ построения диаграммы ЭДС (рис. 6.6).

1. Выбрав масштаб, строят диаграмму линейных ЭДС обмотки высшего напряжения трансформатора. Эта диаграмма представляет собой треугольник  $ABC$ , образованный векторами  $\underline{E}_{AB}$ ,  $\underline{E}_{BC}$ ,  $\underline{E}_{CA}$ . Треугольник является равносторонним в силу симметрии трехфазной системы ЭДС:  $E_{AB} = E_{BC} = E_{CA}$ .

2. Отмечают точку  $a$  диаграммы линейных ЭДС обмотки низшего напряжения (поскольку выводы трансформатора  $A$  и  $a$  соединены, то соответствующие точки диаграммы совпадают.)

3. Проводят окружность радиуса  $E_{bB}$  (в выбранном масштабе) с центром в вершине  $B$  треугольника  $ABC$ . Искомая точка  $b$ , являющаяся концом вектора  $E_{bB}$ , находится на построенной окружности. Где именно — определяется при выполнении следующего пункта.

4. Проводят окружность радиуса  $E_{bC}$  с центром в вершине  $C$ . Две построенные окружности пересекаются в двух точках. Точка пересечения этих окружностей, ближайшая к точке  $a$ , является точкой  $b$  диаграммы (рис. 6.6,  $a$ ).

5. Проводят окружность радиуса  $E_{cB}$  с центром в вершине  $B$ .

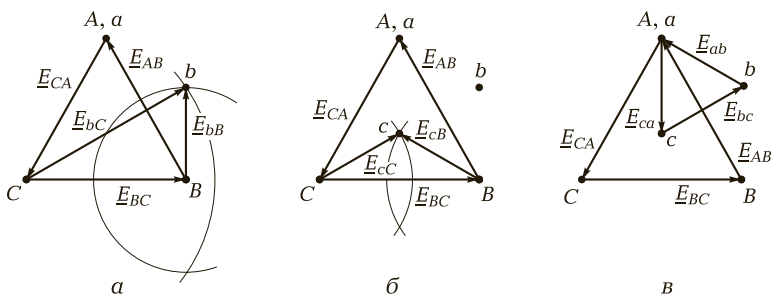


Рис. 6.6. Построение диаграммы ЭДС трансформатора:

$a$  — нахождение положения точки  $b$ ;  $б$  — нахождение положения точки  $c$ ;  $в$  — построенная диаграмма

6. Проводят окружность радиуса  $E_{cc}$  с центром в вершине  $C$ . Точка пересечения последних двух окружностей, ближайшая к точке  $a$ , является точкой  $c$  топографической диаграммы (рис. 6.6, б).

7. Соединяют точки  $a, b, c$ , получая треугольник линейных напряжений обмотки низшего напряжения (рис. 6.6, в).

8. Измеряют угол между векторами  $\underline{E}_{AB}$  и  $\underline{E}_{ab}$ , по которому определяют группу соединения.

**Расчетный метод определения групп соединения обмоток.** Как и в графическом методе, сначала соединяют между собой зажимы  $A$  и  $a$ ; затем измеряют перечисленные ранее напряжения и, помимо них, линейное напряжение обмотки НН  $\underline{U}_{НН} = \underline{U}_{ab}$ , после чего находят эксплуатационный коэффициент трансформации по формуле (6.3). Далее, пользуясь известными формулами для предполагаемой группы соединения, определяют расчетные значения напряжений, которые были до этого измерены. При совпадении вычисленных значений с измеренными делают вывод о том, что действительная группа соединения соответствует предполагаемой.

Упомянутые формулы содержат напряжение  $U_{ab}$  и эксплуатационный коэффициент трансформации и могут быть получены на основании векторных диаграмм из геометрических соображений. Например, для стандартной группы  $Y/\Delta$  — 11 можно получить:

$$U_{bB} = U_{ab} \sqrt{1 - k\sqrt{3} + k^2}; \quad U_{bC} = U_{ab} \sqrt{1 + k^2}; \quad U_{cB} = U_{ab} \sqrt{1 - k\sqrt{3} + k^2},$$

где  $k$  — эксплуатационный коэффициент трансформации.

Для группы  $Y/\Delta$  — 1 формула для  $U_{bB}$  получается такой же, а формулы для  $U_{bC}$  и  $U_{cB}$  меняются местами.

## 6.4. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**Условия включения трансформаторов на параллельную работу.** Параллельной называют работу двух или нескольких трансформаторов, когда их первичные обмотки подключены к общей первичной сети (линии электропередачи), а вторичные — к общей вторичной сети нагрузки (рис. 6.7). При использовании нескольких трансформаторов, соединенных параллельно, проблема электроснабжения потребителей решается лучше, чем в случае применения одного трансформатора, так как при выходе из строя одного из трансформаторов или проведении профилактического ремонта одного из трансформаторов остальные могут принять на себя его нагрузку.

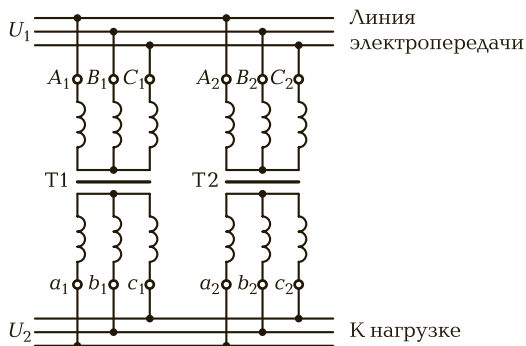


Рис. 6.7. Трансформаторы, включенные на параллельную работу

Кроме того, параллельная работа трансформаторов целесообразна при суточных и сезонных колебаниях нагрузки: при снижении нагрузки отключают часть трансформаторов, уменьшая расход энергии на покрытие потерь.

Для нормальной работы трансформаторов при их параллельном включении необходимо выполнение следующих условий.

У с л о в и е 1: равенство номинальных первичных и вторичных напряжений трансформаторов:  $U_{1номТ1} = U_{1номТ2}$ ;  $U_{2номТ1} = U_{2номТ2}$ .

У с л о в и е 2: принадлежность трансформаторов к одинаковым группам соединения обмоток.

У с л о в и е 3: равенство номинальных напряжений короткого замыкания, а также составляющих этого напряжения (см. подразд. 5.3):  $u_{кТ1} = u_{кТ2}$ ;  $u_{аТ1} = u_{аТ2}$ ;  $u_{рТ1} = u_{рТ2}$ .

**Последствие нарушения условия 1.** Условие 1 сводится к требованию равенства коэффициентов трансформации трансформаторов, включенных на параллельную работу. ЭДС первичных обмоток одинаковы, поскольку каждая из них определяется напряжением первичной сети  $U_1$ . Если же различны коэффициенты трансформации ( $k_{Т1} \neq k_{Т2}$ ), то ЭДС вторичных обмоток различны:  $E_{2Т1} \neq E_{2Т2}$ . Вторичные (как и первичные) обмотки параллельно включенных трансформаторов образуют замкнутые цепи, обладающие малыми сопротивлениями, которые представляют собой сопротивления короткого замыкания трансформаторов. Если в такой цепи действует неуравновешенная система ЭДС, то в ней течет уравнивающий ток  $I_{ур}$  (для сравнения см. подразд. 2.6 о параллельной работе генераторов постоянного тока). Ввиду малости сопротивлений короткого замыкания уравнивающий ток сравним с номинальным током даже при



небольшом различии коэффициентов трансформации. В таких условиях нельзя использовать полную мощность трансформаторов: при полной нагрузке они будут перегружены и при продолжительной работе выйдут из строя. На практике допускается различие коэффициентов трансформации не более 1 %.

**Последствие нарушения условия 2.** Поскольку первичные обмотки включены в общую сеть источника (в линию электропередачи), то векторы их линейных ЭДС попарно равны независимо от групп соединения параллельно включенных трансформаторов. Что касается вторичных обмоток, то при различных группах соединения векторная разность ЭДС (или разность комплексных ЭДС) не равна нулю, и в обмотках течет уравнивающий ток, значительно превышающий номинальный ток. Пусть один из параллельно включенных трансформаторов имеет группу соединения  $Y/Y - 0$ , а второй — группу  $Y/Y - 4$ . Тогда разность фаз между линейными ЭДС вторичных обмоток таких трансформаторов будет составлять  $120^\circ$  (см. рис. 6.5), и модуль разности векторов линейных ЭДС, определяющий уравнивающий ток, будет в  $\sqrt{3}$  раз превышать линейную ЭДС отдельного трансформатора. Уравнивающий ток при этом будет настолько велик, что трансформаторы выйдут из строя.

**Последствие нарушения условия 3.** При неравенстве номинальных напряжений короткого замыкания нагрузка между параллельно работающими трансформаторами распределяется неравномерно. Покажем это.

Согласно упрощенной схеме замещения трансформатора (точнее, одной его фазы), показанной на рис. 5.5, в, напряжение первичной обмотки

$$U_1 = -U'_2 + I_1 Z_k, \quad (6.6)$$

где  $Z_k$  — комплексное напряжение короткого замыкания трансформатора (см. формулы (5.9) и (5.25)).

Согласно упрощенной схеме замещения двух трансформаторов, включенных на параллельную работу (рис. 6.8), их первичные, а также вторичные напряжения одинаковы:  $U_{1T1} = U_{1T2} = U_1$ ;  $U_{2T1} = U_{2T2} = U_2$ . В этом случае согласно уравнению (6.6) падения напряжения в сопротивлениях короткого замыкания двух трансформаторов должны быть также одинаковыми:  $I_{1T1} Z_{kT1} = I_{1T2} Z_{kT2}$ , где  $I_{1T1}$  и  $I_{1T2}$  — токи первичных обмоток трансформаторов Т1 и Т2;  $Z_k$  — полное сопротивление короткого замыкания трансформатора (модуль комплексного сопротивления). Отсюда следует связь между токами трансформаторов и их сопротивлениями КЗ:

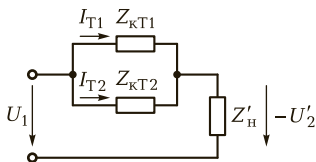


Рис. 6.8. Упрощенная схема замещения двух трансформаторов, включенных на параллельную работу

$$\frac{I_{Т1}}{I_{Т2}} = \frac{Z_{кТ2}}{Z_{кТ1}}. \quad (6.7)$$

Для дальнейших выкладок понадобится выражение относительного номинального напряжения короткого замыкания  $u_k = \frac{I_{\text{ном}} Z_k}{U_{\text{ном}}} \cdot 100$  (см. формулы (5.33)). Из этого выражения получим

$$Z_k = \frac{u_k U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}} \cdot 100}. \quad (6.8)$$

Из выражений (6.7) и (6.8) следует

$$\frac{I_{Т1}}{I_{Т2}} = \frac{u_{кТ2} U_{\text{номТ2}} I_{\text{номТ1}} \cdot 100}{I_{\text{номТ2}} \cdot 100 u_{кТ1} U_{\text{номТ1}}}.$$

Учтем, что к первичным обмоткам двух параллельно соединенных трансформаторов приложено одно и то же напряжение (причем неважно, является ли это напряжение номинальным для данных трансформаторов). Кроме того, будем считать, что номинальные токи трансформаторов одинаковы, что в большинстве случаев выполняется. Принимая во внимание сказанное, произведем сокращения и получим

$$\frac{I_{Т1}}{I_{Т2}} = \frac{u_{кТ2}}{u_{кТ1}}. \quad (6.9)$$

Итак, токи нагрузки параллельно работающих трансформаторов обратно пропорциональны их напряжениям короткого замыкания. Поскольку мощности нагрузки пропорциональны токам, а напряжения первичных обмоток одинаковы ( $S_{Т1} = U_1 I_{Т1}$ ;  $S_{Т2} = U_1 I_{Т2}$ ), то указанная зависимость имеет место и для мощностей нагрузки.

Из выражения (6.9) следует, что если трансформатор с меньшим  $u_k$  нагружен номинальным током (номинальной мощностью), то трансформатор с бóльшим  $u_k$  будет недогружен. Если же трансформатор с бóльшим  $u_k$  нагрузить номинальным током, то трансформатор с меньшим значением этого параметра окажется перегруженным и длительно работать не сможет.

На практике, чтобы недоиспользование установленной мощности было малым, на параллельную работу включают такие трансформаторы, напряжения короткого замыкания которых отличаются друг от друга не более чем на  $\pm 10\%$ .

Недоиспользование установленной мощности трансформаторов имеет место также в том случае, когда при равенстве номинальных напряжений короткого замыкания не соблюдается равенство активных составляющих этого параметра и, соответственно, равенство реактивных составляющих.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. В каких случаях используются трансформаторные группы вместо трехфазного трансформатора, выполненного в виде отдельного аппарата?
2. Почему в магнитопроводе трехфазного трансформатора нет необходимости в стержне, по которому замыкались бы магнитные потоки отдельных фаз?
3. Какие функции выполняет трансформаторное масло? Для чего служат маслорасширитель, газовое реле, выхлопная труба и термосифонный фильтр в масляном трансформаторе?
4. Какие существуют способы регулирования коэффициента трансформации трансформатора? Каково главное условие регулирования под нагрузкой?
5. Какие существуют способы соединения обмоток трехфазных трансформаторов? Что называется конструктивным и эксплуатационным коэффициентом трансформации?
6. Что входит в понятие «группа соединения обмоток трансформатора»? От чего зависит группа соединения?
7. Какие методы определения группы соединения обмоток трансформатора вам известны? Опишите графический метод.
8. Назовите условия включения трансформаторов на параллельную работу. Каковы последствия нарушений этих условий?

## СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТИПЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

### 7.1. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

Однофазный автотрансформатор отличается от однофазного трансформатора тем, что имеет только одну обмотку, часть которой принадлежит одновременно первичной и вторичной цепи (рис. 7.1, а). Основные соотношения, характеризующие трансформаторы, применимы и к автотрансформаторам, в частности, равенства (4.5)... (4.7), (5.16). Предполагается, что в этих равенствах  $w_1$  — число витков между точками А и Х автотрансформатора;  $w_2$  — число витков между точками а и Х.

В первом приближении, пренебрегая током холостого хода, из последнего упомянутого равенства получим:  $I_1 w_1 + I_2 w_2 \approx 0$ , т. е. токи  $I_1$  и  $I_2$  сдвинуты по фазе один относительно другого приблизительно на  $180^\circ$ . В этом случае для узла а на рис. 7.1, а уравнение по первому закону Кирхгофа может быть записано в арифметической форме:

$$I_2 - I_1 = I_{12}, \quad (7.1)$$

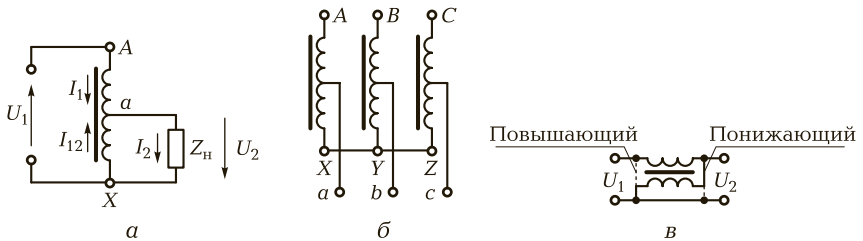


Рис. 7.1. Схемы автотрансформаторов:

а — однофазного; б — трехфазного; в — включение двухобмоточного трансформатора по схеме автотрансформатора

где  $I_{12}$  — ток, текущий по части обмотки, являющейся общей для первичной и вторичной цепей.

Поскольку напряжение  $U_2$  меньше напряжения  $U_1$  (трансформатор понижающий), то согласно равенству (4.7) ток  $I_2$  больше тока  $I_1$ . Заметим, что на рис. 7.1, а (в отличие, например, от рис. 5.5, а) указаны не условные положительные направления токов, а их действительные направления в течение одной половины периода.

Одним из преимуществ автотрансформатора по сравнению с двухобмоточным трансформатором является меньший расход меди. Действительно, если в двухобмоточном трансформаторе сечение провода первичной обмотки с числом витков  $w_1$  должно быть рассчитано на ток  $I_1$ , а сечение провода вторичной обмотки с числом витков  $w_2$  должно быть рассчитано на ток  $I_2$ , то в автотрансформаторе нет необходимости выбора провода какой-либо части обмотки из расчета значения большего тока  $I_2$ . Число витков ( $w_1 - w_2$ ) обмотки автотрансформатора должно быть рассчитано на ток  $I_1$ , а число витков  $w_2$  — на разностный ток  $I_{12}$ .

Необходимый расход стали (сечение магнитопровода) в автотрансформаторе также меньше, чем в двухобмоточном трансформаторе. Причина заключается в том, что энергия из первичной во вторичную цепь автотрансформатора частично передается *электрическим путем* за счет электрического соединения частей обмотки.

Полная мощность вторичной цепи  $S_2 = U_2 I_2$ . Перепишем это выражение с учетом уравнения  $I_2 = I_1 + I_{12}$ , которое следует из уравнения (7.1):

$$S_2 = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = S_{2э} + S_{2эм}$$

где  $S_{2э}$  — электрическая часть полной мощности,  $S_{2эм}$  — электромагнитная часть, которая определяет магнитный поток и, значит, необходимое сечение и массу магнитопровода.

Другие преимущества автотрансформаторов по сравнению с двухобмоточными трансформаторами таковы: меньшие потери энергии и, следовательно, более высокий КПД; меньшее изменение напряжения вторичной цепи при изменении нагрузки.

Автотрансформаторы применяются при малых коэффициентах трансформации ( $k = 1 \dots 2$ ), поскольку в этом случае их преимущества проявляются в наибольшей мере.

Недостатками автотрансформаторов являются возможность падения напряжения цепи ВН в цепь НН, а также малое сопротивление короткого замыкания, что определяет большую кратность тока короткого замыкания.

Как и двухобмоточные трансформаторы, автотрансформаторы могут быть понижающими или повышающими в зависимости от того, какие зажимы подключены к сети и какие к нагрузке.

На рис. 7.1, б показана схема трехфазного автотрансформатора, а на рис. 7.1, в — способы включения двухобмоточного трансформатора по схеме автотрансформатора.

Автотрансформаторы применяются для связи высоковольтных сетей с близкими напряжениями (например, 154 и 220 кВ; 220 и 400 кВ); для пуска асинхронных и синхронных двигателей (см. подразд. 9.4); в качестве регуляторов напряжения (в этом случае ответвление в цепь НН осуществляется через подвижный контакт).

## 7.2. МНОГООБОМОТЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Многообмоточные трансформаторы, в которых на магнитопроводе, помимо обмоток высшего и низшего напряжения, помещают обмотки промежуточных напряжений, применяют в случаях, когда необходимо получить несколько напряжений. Применение многообмоточных трансформаторов удешевляет электрическую подстанцию по сравнению с использованием нескольких двухобмоточных.

Особенности многообмоточных трансформаторов будем рассматривать для простоты на примере трехобмоточного трансформатора (рис. 7.2). Уравнение магнитодвижущих сил такого трансформатора записывается в виде

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 + I_3 w_3 = I_0 w_1 \quad (7.2)$$

(ср. с уравнением (5.16): МДС первичной обмотки  $I_1 w_1$  создает магнитный поток в магнитопроводе и компенсирует размагничивающее поле остальных обмоток).

Из опыта холостого хода трехобмоточного трансформатора, который проводится так же, как для двухобмоточного, определяют коэффициенты трансформации:

$$k_{12} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \quad \text{и} \quad k_{13} = \frac{w_1}{w_3} \approx \frac{U_1}{U_3}.$$

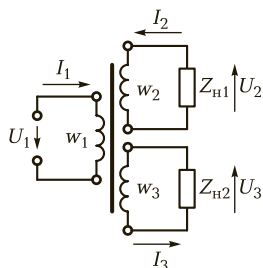


Рис. 7.2. Трехобмоточный трансформатор с двумя вторичными обмотками

Зная  $k_{12}$  и  $k_{13}$ , можно найти коэффициент трансформации между обмотками 2 и 3:

$$k_{23} = \frac{w_2}{w_3} = \frac{k_{13}}{k_{12}}.$$

Для трехобмоточного трансформатора выполняют три опыта короткого замыкания:

- в опыте 1 напряжение подается на обмотку 1, обмотка 2 закорачивается, а обмотка 3 остается разомкнутой;
- в опыте 2 напряжение подается также на обмотку 1, а закорачиваемая и размыкаемая обмотки меняются местами;
- в опыте 3 напряжение подается на обмотку 2, обмотка 3 закорачивается, а обмотка 1 остается разомкнутой.

Особенностью трехобмоточного трансформатора является взаимное влияние вторичных обмоток. При изменении нагрузки одной из обмоток напряжение изменяется в обеих. Действительно, изменение тока в какой-либо одной вторичной обмотке вызывает соответствующее изменение тока в первичной (как это имеет место в двухобмоточном трансформаторе, см. подразд. 5.2); при этом изменяется падение напряжения в полном сопротивлении первичной обмотки, а это влечет за собой изменение ЭДС и напряжений обеих вторичных обмоток (в многообмоточном — всех вторичных).

Если первичную обмотку поместить в промежутке между двумя другими обмотками, расположенными концентрически, то взаимное влияние двух вторичных обмоток будет меньше, чем при ином сочетании обмоток (концентрическое размещение обмоток (см. на рис. 4.1, а)).

Стандартными группами соединений трехфазных трехобмоточных трансформаторов являются следующие две:  $Y_0/Y_0/\Delta — 0 — 11$  и  $Y_0/\Delta/\Delta — 11 — 11$ . В однофазных трехобмоточных трансформаторах применяют группу  $I/I/I — 0 — 0$ .

Трехобмоточные трансформаторы строят обычно на большие мощности. При работе двух генераторов на общую линию электропередачи применяют трехобмоточные трансформаторы с двумя первичными и одной вторичной обмоткой.

### 7.3. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

**Измерительные трансформаторы напряжения (ИТН).** Являются измерительными преобразователями, предназначенными для расширения пределов измерения по напряжению электроизмеритель-

ных приборов переменного тока: вольтметров, частотомеров, ваттметров, счетчиков электроэнергии, фазометров. ИТН применяются при измерениях в цепях высоких напряжений (приборы для непосредственных измерений в таких цепях были бы непомерно громоздкими, и процесс измерения представлял бы большую опасность).

Обмотка ВН измерительного трансформатора напряжения включается на напряжение первичной цепи  $U_1$  (измеряемое напряжение), а обмотка НН присоединяется к зажимам измерительного прибора или к выводам *цепи напряжения* измерительного прибора. Таким образом, способ включения ИТН аналогичен способу включения силового трансформатора (см. рис. 5.5, а), но в качестве нагрузки может выступать вольтметр, частотомер или цепь напряжения ваттметра, счетчика, фазометра. При необходимости включения нескольких приборов их соединяют между собой *параллельно*, так что на каждый из них оказывается поданным вторичное напряжение  $U_2$ . Коэффициент трансформации, определяемый выражением (4.6), показывает, во сколько раз расширяется предел измерения измерительного прибора, подключенного к вторичной обмотке, и выражается в виде дроби, например,  $\frac{10\,000}{100}$ ,  $\frac{35\,000}{100}$ , где в числителе стоит номинальное напряжение первичной обмотки (оно же максимальное измеряемое напряжение), выраженное в вольтах, а в знаменателе — номинальное напряжение вторичной обмотки, обычно равное 100 В.

Особенностью режима работы ИТН, по сравнению с силовыми трансформаторами, является большое сопротивление подключаемых приборов (режим, близкий к холостому ходу). Технической документацией определяется максимальная мощность, потребляемая приборами, включенными во вторичную цепь. При увеличении потребляемой мощности (в частности, при увеличении числа параллельно включаемых приборов) увеличивается ток вторичной обмотки и ввиду этого, уменьшается вторичное напряжение. При этом изменяется действительное значение коэффициента трансформации, и когда потребляемая мощность превышает допустимое максимальное значение, погрешность измерения выходит за пределы допустимой (допустимая погрешность определяется классом точности измерительного трансформатора).

Замыкать зажимы вторичной обмотки ИТН накоротко или на малое сопротивление нельзя, поскольку это вызовет возникновение токов первичной и вторичной обмотки недопустимо больших значений (см. подразд. 5.3).



На схемах измерительные трансформаторы напряжения имеют буквенное обозначение *TV*.

**Измерительные трансформаторы тока (ИТТ).** Это измерительные преобразователи, предназначенные для расширения пределов измерения *по току* электроизмерительных приборов переменного тока: амперметров, ваттметров, счетчиков электроэнергии, фазометров. ИТТ применяются при измерениях токов больших значений, а также в тех случаях, когда нужно измерять сравнительно небольшие токи, протекающие в цепях высокого напряжения.

ИТТ включается по схеме, показанной на рис. 7.3. Первичная обмотка, условно изображаемая утолщенным отрезком прямой, включается в разрыв провода, ток  $I_1$  в котором нужно измерить. При необходимости включения нескольких приборов они соединяются между собой *последовательно*, так что через каждый из них протекает один и тот же ток  $I_2$ . Коэффициент трансформации ИТТ определяется следующим образом:

$$k_{\text{ИТТ}} = \frac{w_2}{w_1} \approx \frac{I_1}{I_2} \quad (7.3)$$

(см. соотношение (4.7)).

Таким образом, понижающий трансформатор тока имеет вторичную обмотку, содержащую большее число витков, чем первичная. В частности, первичная обмотка может содержать всего один виток. Коэффициент трансформации ИТТ выражается в виде дроби, например,  $\frac{100}{5}, \frac{600}{5}$ , где в числителе стоит номинальный ток первичной обмотки, выраженный в амперах, а в знаменателе — номинальный ток вторичной обмотки, обычно равный 5 А.

Способ включения первичной обмотки ИТТ, отличный от способа включения ИТН и силовых трансформаторов, определяет особенности работы ИТТ. К зажимам вторичной обмотки подключаются амперметры или *токовые цепи* ваттметров, счетчиков, фазометров, обладающие низким сопротивлением, так что режим работы ИТТ оказывается близким к режиму короткого замыкания. Для ИТТ этот

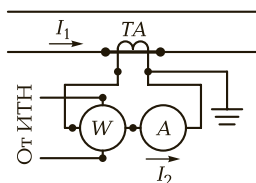


Рис. 7.3. Схема включения измерительного трансформатора тока

режим безопасен. При коротком замыкании в первичной цепи течет измеряемый ток  $I_1$ , а во вторичной — ток  $I_2$ , МДС которого компенсирует МДС первичного тока, так что магнитный поток будет определяться небольшим током намагничивания, как в рабочем режиме силового трансформатора (см. подразд. 5.2).

В отличие от трансформатора напряжения, вторичную обмотку ИТТ *недопустимо размыкать*. Действительно, при размыкании вторичной обмотки в магнитопроводе возникает магнитный поток большого значения, которое определяется большим током первичной обмотки  $I_1$ . (Как видно из схемы включения ИТТ, *первичный ток этого трансформатора в любом режиме, включая режим холостого хода, является измеряемым током линии.*) Возникший поток создает недопустимо большую ЭДС вторичной обмотки, что может привести к пробое изоляции и поражению обслуживающего персонала.

Технической документацией ИТТ определяется максимальная мощность, потребляемая приборами во вторичной цепи. При увеличении потребляемой мощности (в частности, при увеличении числа последовательно включаемых приборов) действительный коэффициент трансформации становится все более отличающимся от номинального (равенство отношения чисел витков отношению токов (7.3) становится все более неточным).

На схемах измерительные трансформаторы тока имеют буквенное обозначение *ТА*.

## 7.4. ДРУГИЕ ТИПЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**Сварочные трансформаторы.** Трансформатор для дуговой электросварки — это однофазный двухобмоточный трансформатор с номинальным первичным напряжением 220 или 380 В и номинальным вторичным напряжением 60 — 70 В. Такое вторичное напряжение необходимо для надежного зажигания и устойчивого горения электрической дуги между металлическим электродом и свариваемыми деталями.

Один конец вторичной обмотки сварочного трансформатора соединяется со сварочным электродом, второй конец — со свариваемой деталью. Перед зажиганием дуги электрод приводят в контакт с деталью, создавая тем самым режим короткого замыкания. При обрыве дуги трансформатор оказывается в режиме холостого хода. Таким образом, для сварочного трансформатора характерен прерывистый режим работы. Для устойчивого горения дуги желательно, чтобы внешняя характеристика (зависимость напряжения

на вторичной обмотке от тока во вторичной цепи) приближалась к вертикальной, что соответствует малым изменениям тока при значительных изменениях напряжения, которые имеют место при непостоянстве расстояния между электродом и деталью.

Чтобы ограничить ток в режиме короткого замыкания и обеспечить надежную форму внешней характеристики, во вторичную цепь, последовательно с вторичной обмоткой, электродом и деталью, включают дроссель, обладающий высоким индуктивным сопротивлением. Достижению указанной цели способствует также размещение первичной и вторичной обмоток *на разных стержнях* магнитопровода (это увеличивает магнитный поток рассеяния).

Для регулировки рабочего тока  $I_2$  магнитопровод дросселя выполняют из двух частей, между которыми имеется воздушный зазор (обмотка находится на одной части). Вращая винт с помощью маховика, изменяют величину зазора. Нулевому зазору соответствует максимальное индуктивное сопротивление дросселя и минимальный рабочий ток.

**Пик-трансформаторы.** Применяются для преобразования синусоидального напряжения в напряжение пикообразной формы, которое необходимо, в частности, для управления полупроводниковыми устройствами (например, тиристорами (см. подразд. 3.9)).

Принцип работы пик-трансформатора основан на явлении насыщения материала магнитопровода. В пик-трансформаторе с магнитным шунтом (рис. 7.4) первичная обмотка с числом витков  $w_1$  расположена на стержне 1 увеличенного сечения, в котором магнитное насыщение незначительно, так что при возрастании мгновенного значения тока первичной обмотки  $i_1$  магнитный поток  $\Phi_1$  также возрастает, хотя и не точно по линейному закону. Вторичная обмотка с числом витков  $w_2$  находится на стержне 2 уменьшенного сечения. При некотором мгновенном значении тока первичной обмотки

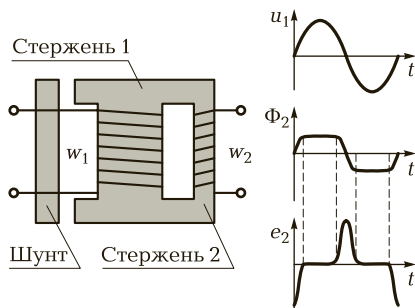


Рис. 7.4. Пик-трансформатор с магнитным шунтом

в этом стержне возникает магнитное насыщение, и при дальнейшем увеличении тока магнитный поток  $\Phi_2$  этого стержня остается практически постоянным.

Итак, магнитный поток двух стержней с увеличением тока  $i_1$  изменяется по-разному. Но это не могло бы иметь место, если бы магнитопровод представлял собой замкнутую неразветвленную систему двух стержней, соединенных ярмами, как в однофазном стержневом трансформаторе, поскольку магнитный поток неразветвленного магнитопровода имеет одно и то же значение во всех его сечениях.

У пик-трансформатора имеется третий стержень — магнитный шунт, в который ответвляется часть магнитного потока, созданного первичной обмоткой, поэтому поток первого стержня равен сумме потоков двух других стержней:

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_{\text{ш}}, \quad (7.4)$$

где  $\Phi_{\text{ш}}$  — поток третьего стержня — магнитного шунта.

Шунт отделен от остальной части магнитопровода воздушным зазором, и благодаря этому насыщение в шунте отсутствует, так что с увеличением тока первичной обмотки поток  $\Phi_{\text{ш}}$  увеличивается по линейному закону.

Если напряжение, подаваемое на первичную обмотку, синусоидально (график зависимости мгновенные значения  $u_1$  от времени показан на рис. 7.4), то синусоидален и магнитный поток  $\Phi_1$ . (Это утверждение следует из выражения (4.3) с учетом приблизительных равенств (5.1) и (5.2).) При наличии магнитного шунта выполняется уравнение (7.4), и потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  имеют возможность изменяться по-разному. Поток  $\Phi_2$  стержня 2, достигая определенного значения, остается в течение большей части полупериода постоянным ввиду магнитного насыщения, как показано на соответствующем графике, имеющемся на рис. 7.4.

ЭДС вторичной обмотки подчиняется закону электромагнитной индукции (см. выражения (4.1)), из которого следует, что ЭДС не индуцируется, если магнитный поток неизменен, и возникает только при его изменении. В результате график зависимости мгновенного значения ЭДС вторичной обмотки  $e_2$  от времени имеет вид периодически повторяющихся пиков, как показано на рис. 7.4. Такую же форму имеет и выходное напряжение пик-трансформатора (см. равенство (5.2)).

**Умножители частоты.** Помимо описанных типов трансформаторов существуют трансформаторы, преобразующие частоту напряжения, в частности увеличивающие ее в 2—3 раза. Такие трансфор-

маторы называются умножителями частоты. Они представляют собой довольно сложные системы обмоток и магнитопроводов. Существенную роль в работе умножителей, как и в работе пик-трансформаторов, играет явление магнитного насыщения.

**Магнитные усилители.** Это электромагнитные устройства, которые по внешним признакам можно рассматривать как тип трансформатора. Магнитные усилители предназначены для преобразования слабого электрического сигнала (изменения напряжения или тока) в сигнал значительно большей мощности. Такие устройства применяются, в частности, на башенных кранах для автоматического регулирования тока возбуждения тормозной машины, а также в схеме корректора напряжения синхронного генератора.

Простейший магнитный усилитель — однофазный дроссель с Ш-образным магнитопроводом — имеет три стержня. Катушки переменного тока, помещенные на крайних стержнях, соединены друг с другом таким образом, чтобы создаваемые ими переменные магнитные потоки в среднем стержне были направлены встречно, т. е. взаимно уничтожались. Катушки переменного тока включаются в цепь потребителя и составляют рабочую обмотку. На среднем стержне магнитопровода расположена обмотка управления, которая подключается к источнику постоянного тока.

Индуктивное сопротивление катушек переменного тока зависит от значения постоянного тока в обмотке управления, что объясняется магнитным насыщением (при насыщении магнитопровода уменьшается его магнитная проницаемость  $\mu$ , от которой зависит индуктивность катушек). Если в обмотке управления нет тока, то индуктивное сопротивление рабочих катушек будет большим, и ток потребителя будет иметь наименьшее значение. С появлением тока в цепи обмотки управления реактивное сопротивление рабочих катушек уменьшится и возрастет ток в цепи потребителя.

Мощность постоянного тока в цепи обмотки управления намного меньше мощности переменного тока рабочей обмотки, включенной в цепь потребителя. Поэтому, затрачивая малую мощность в обмотке управления, можно регулировать величину переменного тока в цепи потребителя большой мощности.

Магнитный усилитель может иметь несколько обмоток управления. Направление тока в каждой из обмоток управления и, следовательно, направление магнитного потока каждой обмотки зависит от схемы включения обмоток. Обмотки управления могут включаться таким образом, чтобы их магнитные потоки были направлены встречно и ослабляли друг друга, и могут включаться так, чтобы магнитные потоки имели одинаковое направление.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Каковы отличия автотрансформатора от двухобмоточного трансформатора? Каковы преимущества автотрансформатора перед двухобмоточным? В каких случаях целесообразно применять автотрансформаторы?
2. Как выполняются опыты холостого хода и короткого замыкания трехобмоточного трансформатора?
3. Каковы преимущества применения трехобмоточного трансформатора вместо двух двухобмоточных? Каковы недостатки многообмоточных трансформаторов по сравнению с двухобмоточными?
4. Для чего предназначен измерительный трансформатор напряжения? Каковы особенности измерительного трансформатора напряжения по сравнению с силовым трансформатором?
5. Для чего предназначен измерительный трансформатор тока? Каковы особенности режима работы измерительного трансформатора тока? Чем обусловлены эти особенности? Почему вторичную обмотку трансформатора тока нельзя размыкать?
6. Каковы особенности режима работы сварочного трансформатора и как отражаются эти особенности на его конструкции?
7. Каково назначение и принцип работы пик-трансформатора?
8. Каково назначение и принцип работы магнитного усилителя?

# МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

## III

### РАЗДЕЛ

Глава 8. Общие вопросы

Глава 9. Трехфазные асинхронные машины с вращающимся ротором

Глава 10. Специальные типы асинхронных машин

Глава 11. Синхронные генераторы

Глава 12. Параллельная работа синхронных генераторов

Глава 13. Синхронные двигатели и компенсаторы

Глава 14. Другие типы машин переменного тока

# ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

## 8.1. ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Среди электрических машин особое положение занимают трехфазные синхронные генераторы (основной источник электроэнергии в мире) и трехфазные асинхронные двигатели (наиболее надежные и простые по конструкции преобразователи электрической энергии в механическую).

Все машины переменного тока объединяет общая конструкция неподвижной части — *с т а т о р а*. Различия синхронных и асинхронных машин переменного тока касаются, прежде всего, конструкции вращающейся части — *р о т о р а*. Ротор *синхронной машины* представляет собой электромагнит. При вращении ротора его магнитное поле пересекает проводники обмотки ротора, и в них наводится переменная ЭДС.

Из этого следует, что роли основных частей синхронного генератора и генератора постоянного тока меняются местами: в наиболее распространенном типе конструкции синхронного генератора *обмотка возбуждения* магнитного поля находится *на роторе*, а *обмотка якоря* — *на статоре* (напомним, что якорем называют ту часть генератора, в которой наводится ЭДС, в генераторе постоянного тока вращающаяся часть служит якорем, а на статоре находится обмотка возбуждения (см. подразд. 1.1, 1.2)).

В работе синхронного и асинхронного двигателей важнейшую роль играет *вращающееся магнитное поле*, которое создается токами, протекающими по обмотке статора.

В синхронной машине частота вращения магнитного поля статора равна частоте вращения ротора, а в асинхронной машине эти частоты не равны.

Рассмотрим условия возникновения вращающегося магнитного поля.



На рис. 8.1, *a* показана временная диаграмма трехфазной системы токов. Мгновенное значение каждого из токов зависит от времени следующим образом:

$$i_A = I_m \sin \omega t; \quad i_B = I_m \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right); \quad i_C = I_m \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right). \quad (8.1)$$

Мгновенное значение тока  $i_A$  равно нулю в момент времени  $t = 0$ ; начиная с этого момента ток  $i_A$  становится положительным и возрастает до момента времени  $t = T/4$  (положительным и отрицательным значениям тока соответствуют его разные направления). Ток  $i_B$ , как видно из условий (8.1), отстает по фазе от тока  $i_A$  на  $2\pi/3$  рад., т. е. на  $1/3$  периода. Это означает, что ток фазы *B* проходит через нулевое значение и становится положительным на треть периода позже, чем ток фазы *A*, что и показано на рис. 8.1, *a*. Ток  $i_C$  отстает по фазе от тока  $i_B$  также на  $T/3$ , а от тока  $i_A$  на  $2T/3$ , или на  $4\pi/3$  рад.

На рис. 8.1, *б* показана система трех катушек. Каждая катушка смещена в пространстве относительно другой на центральный угол  $120^\circ$ , т. е. на треть окружности. Стороны катушек, перпендикулярные плоскости рисунка, обозначены соответственно *A* и *X*; *B* и *Y*; *C* и *Z*. Торцевые стороны, проходящие вдоль плоскости рис. 8.1, *б*, не показаны.

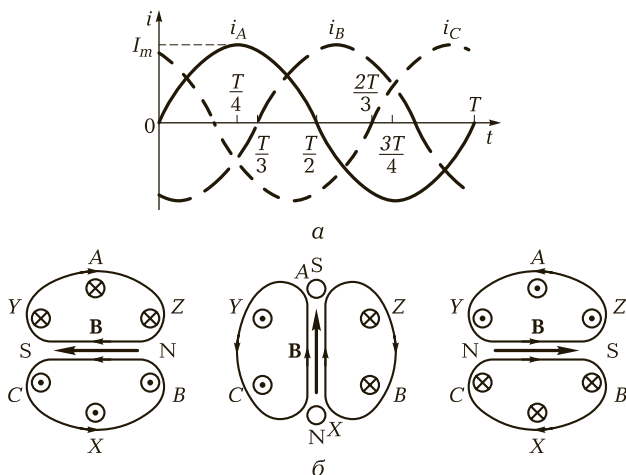


Рис. 8.1. К объяснению условий возникновения вращающегося магнитного поля:

*a* — трехфазная система токов; *б* — магнитное поле в трехфазной системе катушек в разные моменты времени

Рассмотрим, прежде всего, магнитное поле, которое создается синусоидальным током, проходящим по отдельной катушке, например по катушке  $AХ$ . Если в некоторый момент времени ток, текущий по проводнику  $A$ , направлен *от нас* (это направление показано крестиком, см. рис. 8.1, б, слева), то по проводнику  $X$  ток будет течь *на нас* (показано точкой). Направление вектора индукции магнитного поля внутри катушки, определяемое правилом буравчика, показано для данного момента времени на рисунке. Через полпериода направление тока в катушке изменится на противоположное, и также изменится на противоположное направление вектора магнитной индукции. При протекании по отдельной катушке переменного тока получаем *пульсирующее магнитное поле*, вектор индукции которого изменяется по величине в соответствии с изменением мгновенного значения тока, и изменяется по направлению каждые полпериода.

Выясним теперь характер магнитного поля системы трех катушек, которые подключены к сети трехфазного напряжения. Рассмотрим три каких-либо момента времени. В момент  $t = T/4$ , согласно рис. 8.1, а, мгновенное значение тока  $i_A$  положительно, а мгновенные значения токов  $i_B$  и  $i_C$  отрицательны. Будем считать ток положительным, когда в стороне катушки  $A$ ,  $B$  или  $C$  он течет *от нас*, и отрицательным, когда в этой стороне он течет *на нас* (в стороне катушки  $X$ ,  $Y$  или  $Z$  наоборот). На рис. 8.1, б, слева направления токов в момент времени  $t = T/4$  показаны в соответствии с этим соглашением.

Видим, что в трех верхних проводниках ( $Y$ ,  $A$  и  $Z$ ) токи текут *от нас*, а в трех нижних проводниках ( $C$ ,  $X$  и  $B$ ) — *на нас*. Изобразим, пользуясь правилом буравчика, одну силовую линию общего магнитного поля трех верхних проводников и одну силовую линию поля трех нижних проводников. Внутри системы катушек эти линии проходят справа налево. В эту же сторону направлен вектор магнитной индукции  $\mathbf{B}$  поля системы катушек.

Таким образом, система трех катушек с токами создает внутри себя в рассматриваемый момент времени поле, подобное полю магнита, северный полюс  $N$  которого находится справа (из него внутрь системы катушек выходят силовые линии), а южный  $S$  слева. (При рассмотрении внешнего поля, создаваемого системой катушек, северный полюс в данный момент времени находится слева, но нас интересует поле именно во внутренней области, где находится ротор асинхронной или синхронной машины.)

В момент времени  $t = T/2$  ток  $i_A$ , согласно рис. 8.1, а, равен нулю; ток  $i_B$  положителен, а ток  $i_C$  отрицателен. Направления токов, силовых линий и вектора магнитной индукции общего поля катушек показаны для этого момента на рис. 8.1, б, посередине. Видим, что

за четверть периода изменения тока вектор магнитной индукции повернулся на четверть оборота.

На рис. 8.1, б, справа показана картина токов и поля через следующие четверть периода. Вектор  $\mathbf{B}$  повернулся к этому моменту времени еще на четверть оборота.

Итак, мы выяснили, что *три катушки создают магнитное поле, вектор индукции которого вращается в пространстве* при выполнении двух условий:

- каждая катушка смещена в пространстве относительно других на треть окружности;
- по катушкам протекает трехфазная система токов, в которой разность фаз между отдельными токами составляет треть периода.

Частота вращения поля катушек равна при этом частоте токов, т. е. за период изменения тока вектор магнитной индукции совершает полный оборот. Поскольку частоту вращения принято измерять в оборотах в минуту, запишем

$$n_1 = 60f, \quad (8.2)$$

где  $n_1$  — частота вращения магнитного поля системы трех катушек, об/мин;  $f$  — частота тока, Гц.

В курсе электротехники доказывается замечательное свойство поля трехфазной системы токов — *неизменность во времени* модуля вектора  $\mathbf{B}$ . В любой момент времени модуль суммарного поля

$$B = \frac{3}{2} B_{1m}, \quad (8.3)$$

где  $B_{1m}$  — амплитуда магнитной индукции пульсирующего поля, созданного одной катушкой.

Итак, вектор магнитной индукции трехфазной системы токов вращается в пространстве, не изменяясь при этом по модулю.

## 8.2. СТАТОР ТРЕХФАЗНОЙ МАШИНЫ

**Конструкция статора.** Неподвижная часть синхронной или асинхронной машины состоит из корпуса и сердечника, в пазах которого уложена трехфазная обмотка. Корпус изготавливают из чугуна или алюминиевого сплава. Для ослабления вихревых токов сердечник выполняют шихтованным, т. е. набирают из листов электротехнической стали. Каждый лист представляет собой кольцо, на внутренней стороне которого штампуют пазы. Листы покрыты изоляционным

лаком. Конкретное конструктивное исполнение статора зависит от назначения и габаритных размеров машины.

**Обмотки статора.** Обмотки статора трехфазных машин, в зависимости от их расположения в пазах статора, бывают однослойными и двухслойными; в зависимости от метода изготовления — ручными и шаблонными; в зависимости от числа пазов, приходящихся на полюс и фазу, — с целым и дробным числом.

Как и в машинах постоянного тока, части витков, расположенные в пазах, называются активными сторонами; части, соединяющие активные стороны, называются лобовыми соединениями.

Однослойные обмотки (рис. 8.2, а) применяются в машинах малой мощности. Активные стороны такой обмотки лежат на одной цилиндрической поверхности (на спрямленной схеме — в одной плоскости). При намотке лобовые соединения приходится изгибать вручную в различных направлениях.

Двухслойная обмотка (рис. 8.2, б) не требует изгибания; все ее витки одинаковы. Такая обмотка может быть выполнена шаблонной.

Обмотка состоит из катушек. Простейшая трехфазная обмотка, схематически изображенная на рис. 8.1, б, имеет три катушки — по одной на каждую фазу. В простейшей обмотке все проводники одной активной стороны катушки лежат в одном пазу. Такая обмотка называется *сосредоточенной*. Число пазов в этом случае равно 6: оно определяется произведением числа фаз ( $m = 3$ ) на число активных сторон каждой фазы. Число активных сторон одной фазы равно, в свою очередь, числу полюсов машины ( $2p = 2$ ). В таком случае на полюс и фазу приходится один паз ( $q = 1$ ).

В обмотках с целым числом пазов  $q$ , приходящихся на полюс и фазу, шаг обмотки  $y$  (он показан на рис. 8.2) равен полюсному делению  $\tau$ , т.е. расстоянию между серединами соседних разноименных полюсов. В машине с двумя полюсами ( $2p = 2$ ) полюсное деление составляет половину длины окружности, как в случае простейшей обмотки, показанной на рис. 8.1, б.

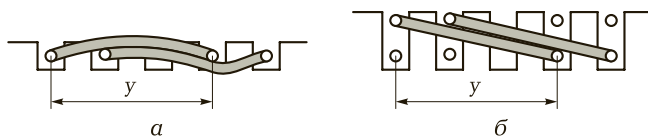


Рис. 8.2. Схемы обмоток:

а — однослойной; б — двухслойной

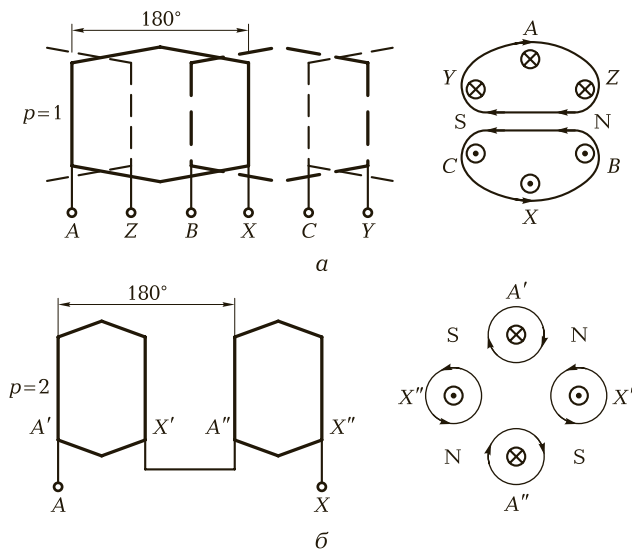


Рис. 8.3. Сосредоточенные обмотки статора и их магнитные поля:  
*a* — при  $p = 1$ ; *б* — при  $p = 2$  (одна фаза обмотки)

На рис. 8.3, *a* дана развернутая схема простейшей трехфазной обмотки — сосредоточенной обмотки, магнитное поле которой характеризуется двумя полюсами. Катушка фазы *A* изображена сплошной линией, а катушки двух других фаз — штриховыми с разной длиной штриха. Утолщенность линий, изображающих катушки, по сравнению с линиями, идущими к зажимам обмотки, означает, что катушки содержат более одного витка. Указан центральный угол между активными сторонами одной катушки ( $180^\circ$ ). Справа на рис. 8.3, *a* приводится пространственное размещение активных сторон обмотки и упрощенная картина магнитного поля в некоторый момент времени (см. также рис. 8.1, *б*).

На рис. 8.3, *б* показана одна фаза обмотки статора, состоящая из двух катушек и образующая четыре полюса (другие фазы не показаны, чтобы не усложнять рисунок). Справа на рисунке видно, каким образом в такой обмотке образуется две пары полюсов. Поле одной фазы является пульсирующим, а результирующее поле всех трех фаз — вращающимся; при этом оно характеризуется тем же количеством полюсов.

В случае двух пар полюсов за период изменения тока магнитное поле повернется не на  $360^\circ$ , а на  $180^\circ$ . Как видно из рис. 8.3, *б*,  $180^\circ$  —

это центральный угол между началом первой и началом второй катушки одной фазы: картина магнитного поля «уплотнена» по углу в 2 раза по сравнению со случаем  $p = 1$ . При увеличении числа пар полюсов во столько же раз уменьшается частота вращения магнитного поля, поскольку в любом случае за период изменения тока вектор магнитной индукции поворачивается на угол, соответствующий двум полюсным делениям. Обобщая сказанное на любое число пар полюсов  $p$ , заключаем, что частота вращения поля статора трехфазной машины определяется по формуле

$$n_1 = \frac{60f}{p}. \quad (8.4)$$

**Распределенные обмотки.** До сих пор рассматривались сосредоточенные обмотки статоров. Однако при производстве трехфазных машин обмотки статоров делают *распределенными*, т. е. витки активной стороны катушки размещают не в одном, а в нескольких пазах (одну катушку делят на несколько катушек). При этом лучше используется окружность статора, а пазы имеют не такой большой объем, как при сосредоточенной обмотке.

Еще одно важное преимущество распределенной обмотки целесообразно проанализировать на примере трехфазного синхронного генератора, в обмотке статора которого индуцируется трехфазная система ЭДС при вращении ротора. При конструировании генераторов стремятся к тому, чтобы ЭДС, индуцируемая в каждой фазе его обмотки, была максимально приближена к синусоидальной, т. е. чтобы в ее спектральном составе как можно в меньшей степени присутствовали высшие гармоники.

**Примечания:**

1. Согласно теореме Фурье любая периодическая функция (в частности, периодически изменяющаяся ЭДС, напряжение или ток) может быть представлена в виде суммы синусоидальных величин (гармоник) с кратными частотами: *основной гармоники* с частотой  $f_{r1} = f$  и *высших гармоник* с частотами  $f_{r2} = 2f$ ,  $f_{r3} = 3f$  и т. д.

2. Если периодическая функция времени *симметрична относительно оси времени* (т. е. если в течение каждой половины периода форма графика функции такая же, как и в течение предыдущей половины периода, но знак функции противоположен), то в разложении этой функции имеются *только нечетные* высшие гармоники  $f_{r3}$ ,  $f_{r5}$ ,  $f_{r7}$  и т. д. Чаще всего это условие реализуется.

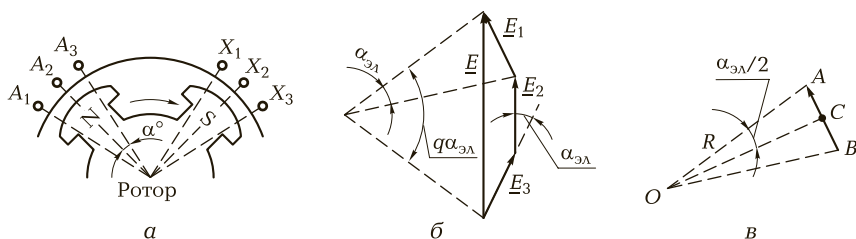


Рис. 8.4. Часть распределенной обмотки статора:  
 а — схема; б — диаграмма ЭДС; в — фрагмент диаграммы

3. Одним из слагаемых в разложении периодической функции может быть *постоянная составляющая*, но к рассматриваемым случаям это не относится.

Наличие высших гармоник в спектральном составе токов и напряжений генераторов и двигателей приводит к увеличению потерь энергии и дополнительному нагреванию машин. Высшие гармоники в линии электропередачи способствуют возникновению перенапряжений и оказывают влияние на расположенные рядом линии связи. Приемники электроэнергии требуют для питания, как правило, синусоидальное напряжение.

ЭДС, индуцируемая *сосредоточенной* обмоткой, не является синусоидальной; высшие гармонические составляющие представлены в ее спектральном составе значительными амплитудами. В *распределенной* же обмотке высшие гармоники заметно подавляются за счет некоторого уменьшения ЭДС.

На рис. 8.4, а показана часть одной фазы обмотки статора, разделенная на три последовательно соединенные катушки:  $A_1X_1$ ,  $A_2X_2$ ,  $A_3X_3$ . Рассматривается случай двух пар полюсов. Три указанные катушки соответствуют одной катушке  $A'X'$  сосредоточенной обмотки (см. рис. 8.3, б). Такая обмотка характеризуется числом пазов на полюс и фазу  $q = 3$ .

Если в синхронном генераторе магнитное поле статора имеет две пары полюсов, то и ротор должен представлять собой электромагнит с двумя парами полюсов, что и показано на рис. 8.3, б. Пусть ротор генератора вращается от приводного двигателя по часовой стрелке. Тогда ЭДС  $E_2$ , индуцируемая в катушке  $A_2X_2$ , будет отставать по фазе от ЭДС  $E_1$ , индуцируемой в катушке  $A_1X_1$ , а ЭДС  $E_3$ , индуцируемая в катушке  $A_3X_3$ , будет отставать по фазе от ЭДС  $E_2$  (пока речь идет только об основных гармониках). Если центральный угол между на-

чалами катушек равен  $\alpha$  ( $^\circ$ ), то разность фаз между соответствующими ЭДС составляет  $\alpha_{\text{эл}}$  электрических градусов (эл. град.).

**П р и м е ч а н и е.** Электрический угол, измеряемый в электрических градусах, связан с геометрическим углом, измеряемым в градусах, следующей формулой:

$$\alpha_{\text{эл}} = p\alpha^\circ. \quad (8.5)$$

Мы рассматриваем случай  $p = 2$ , когда центральный угол между северным и южным полюсом составляет  $90$ , а не  $180^\circ$ , как при одной паре полюсов. Геометрическому углу  $90^\circ$  соответствует в этом случае электрический угол  $180$  эл. град. При любом числе пар полюсов электрический угол между ближайшими противоположными полюсами составляет  $180$  эл. град., причем при  $p = 1$  электрический угол равен геометрическому.

На рис. 8.4, б показана векторная диаграмма электродвижущих сил, индуцируемых в катушках. Учтены сдвиги фаз между ЭДС, измеряемые в электрических градусах (принимается масштаб, когда одному геометрическому градусу на векторной диаграмме соответствует фазовый угол, равный одному электрическому градусу). Поскольку катушки соединены последовательно, то их общая ЭДС  $E$  может быть найдена как векторная сумма ЭДС отдельных катушек или как сумма комплексов этих ЭДС. Ввиду ненулевых разностей фаз между ЭДС катушек модуль векторной суммы меньше суммы модулей векторов ЭДС.

*Коэффициент распределения обмотки  $k_p$*  показывает меру уменьшения суммарной ЭДС при замене сосредоточенной обмотки на распределенную:

$$k_p = \frac{|\underline{E}_1 + \underline{E}_2 + \underline{E}_3 + \dots|}{E_1 + E_2 + E_3 + \dots} = \frac{E}{qE_1}. \quad (8.6)$$

В рассматриваемом случае сумма ограничивается тремя слагаемыми, и число  $q$  принимает значение три. (Символами  $E_1, E_2, E_3$  здесь обозначены основные гармоники ЭДС трех катушек, а не 1-, 2- и 3-я гармоники ЭДС.)

Рассмотрим равнобедренный треугольник  $OAB$  (рис. 8.4, в) с основанием  $AB$ , равным ЭДС  $E_1$  катушки. Боковые стороны  $OA$  и  $OB$  треугольника равны радиусу  $R$  окружности, которая является геометрическим местом концов векторов ЭДС катушек.

Из вершины  $O$  треугольника  $OAB$  проведем перпендикуляр  $OC$  к основанию  $AB$ . В прямоугольном треугольнике  $OAC$  катет  $AC$  является противолежащим по отношению к углу  $\alpha_{\text{эл}}/2$ . По определению синуса



$$\sin \frac{\alpha_{\text{эл}}}{2} = \frac{AC}{OA} = \frac{E_1}{2R},$$

поскольку длина отрезка  $AC$  равна половине модуля ЭДС  $E_1$ . Отсюда выражаем ЭДС одной катушки

$$E_1 = 2R \sin \frac{\alpha_{\text{эл}}}{2}.$$

Выражения суммарной ЭДС трех катушек получается из рассмотрения равнобедренного треугольника, в основании которого находится вектор  $\underline{E}$ , а боковые стороны по-прежнему равны  $R$ . Из рис. 8.4, б видно, что угол при вершине этого треугольника составляет  $q\alpha_{\text{эл}}$ . Соображения, полностью повторяющие предыдущие, приводят к следующему выводу:

$$E = 2R \sin \frac{q\alpha_{\text{эл}}}{2}.$$

Подставим выражения суммарной ЭДС и ЭДС одной катушки в выражение коэффициента распределения (8.6). Получим

$$k_p = \frac{\sin \frac{q\alpha_{\text{эл}}}{2}}{q \sin \frac{\alpha_{\text{эл}}}{2}}. \quad (8.7)$$

Для высших гармонических составляющих ЭДС электрический угол между соседними пазами определяется порядком гармоник  $n$  и  $v$ . Например, для третьей гармоники ( $v = 3$ ;  $f_{г3} = 3f$ ) он составляет  $3\alpha_{\text{эл}}$ ; для гармоники с номером  $v$  этот угол равен  $v\alpha_{\text{эл}}$ . Действительно, за время полного цикла изменения основной гармоники ЭДС, т. е. за время поворота ротора на два полюсных деления, гармоника ЭДС с номером  $v$  претерпевает  $v$  циклов изменений, что соответствует изменению электрического угла на  $360v$  эл. град.

В таком случае для гармонической составляющей ЭДС с номером  $v$  коэффициент распределения обмотки

$$k_{pv} = \frac{\sin \frac{qv\alpha_{\text{эл}}}{2}}{q \sin \frac{v\alpha_{\text{эл}}}{2}}. \quad (8.8)$$

Можно показать, что для высших гармоник коэффициент распределения существенно меньше, чем для основной гармоники. В рассматриваемом здесь примере обмотки, характеризующейся параметрами  $m = 3$  (число фаз),  $q = 3$  (число пазов на полюс и фазу),  $2p = 4$  (число полюсов), число пазов статора  $Z_{\text{п}} = 2mqp = 36$ . При равномерном распределении пазов по окружности статора центральный угол между ближайшими пазами  $\alpha = 360/36 = 10^\circ$ . Ему соответ-

ствуется электрический угол  $\alpha_{э\lambda} = p\alpha = 20$  эл. град. Тогда коэффициент распределения  $k_p$  для основной гармоники, рассчитанный согласно выражению (8.7), равен 0,96. Для 3-, 5- и 7-й гармоник по формуле (8.8) получаются значения:  $k_{p3} = 0,67$ ;  $k_{p5} = 0,22$ ;  $k_{p7} = 0,18$ .

Действующее значение несинусоидальной ЭДС  $E$  выражается следующим образом через действующие значения ЭДС  $E_{r1}$ ,  $E_{r3}$ ,  $E_{r5}$ , отвечающие гармоническим составляющим (при отсутствии постоянной составляющей и четных гармоник):

$$E = \sqrt{E_{r1}^2 + E_{r3}^2 + E_{r5}^2 + \dots} \quad (8.9)$$

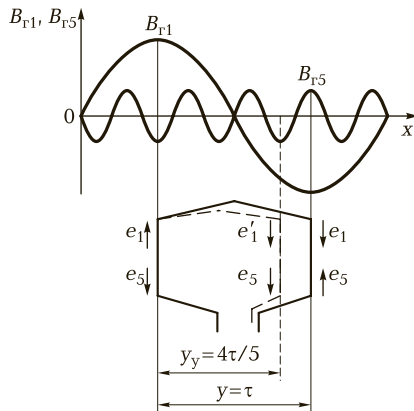
Выражение, аналогичное (8.9), выводится в курсе электротехники при анализе цепей несинусоидального тока. В случае распределенной обмотки каждая из величин  $E_{r1}$ ,  $E_{r3}$ ,  $E_{r5}$  пропорциональна соответствующему коэффициенту распределения. Поскольку коэффициенты распределения — это числа, меньшие единицы, то квадраты этих чисел соответственно меньше самих коэффициентов, что поясняет факт значительного ослабления высших гармоник при использовании распределенной обмотки вместо сосредоточенной.

**Обмотки с укороченным шагом.** Ранее рассматривались обмотки с полным шагом, когда шаг обмотки  $y$  (см. рис. 8.2) равен полюсному делению  $\tau$ . Если шаг обмотки сделать меньше (или больше) полюсного деления, можно обеспечить дополнительное подавление высших гармонических составляющих в кривой ЭДС. В целях экономии обмоточного материала применяют укорочение, а не удлинение шага.

На рис. 8.5 сверху показано *пространственное распределение* основной и 5-й гармоник магнитной индукции, созданной обмоткой статора в определенный момент времени. По горизонтальной оси отложена координата  $x$ , отсчитываемая от некоторого паза по окружности статора. Максимум основной гармоники соответствует той точке на внутренней поверхности статора, к которой направлен в данный момент вектор магнитной индукции поля статора.

На рис. 8.5 внизу сплошной линией изображен виток обмотки статора, для которого выполняется равенство  $y = \tau$ , а штриховой линией — укороченный виток:  $y_y = \frac{4}{5}\tau$ . Из сопоставления верхнего и нижнего частей рис. 8.5 видно, что активные стороны укороченного витка находятся *по отношению к 5-й гармонике магнитного поля* в одинаковых условиях, т. е. под полюсами одинаковой полярности. Поэтому мгновенные ЭДС  $e_5$ , индуцируемые 5-й гармоникой, направлены в обеих сторонах в одну и ту же сторону, а при обходе витка эти ЭДС являются *встречными*, и их алгебраическая сумма

Рис. 8.5. Пространственное распределение основной и 5-й гармоник магнитной индукции; укорочение шага обмотки на  $1/5$  полюсного деления



равна нулю. Таким образом, при укорочении витков обмотки статора на пятую часть полюсного деления в кривой ЭДС будет отсутствовать 5-я гармоника.

При укорочении обмотки на седьмую часть полюсного деления будет равна нулю седьмая гармоника. Чаще всего выбирают  $y_y = \frac{5}{6}\tau$ , чтобы одновременно ослабить 5- и 7-ю гармоники ЭДС машины. Гармоники более высоких порядков имеют значительно меньшие амплитуды.

Что касается 3-й гармоники, то ее обычно не подавляют, поскольку, как показано в курсе электротехники при анализе высших гармоник в трехфазных цепях, в *линейных* ЭДС нет гармоники с номером 3 и с номерами, кратными 3 (такие гармоники всех трех фаз обмотки совпадают друг с другом по фазе, а линейные ЭДС равны *разностям* фазных ЭДС, и поэтому равны нулю).

Укорочение шага обмотки приводит к некоторому уменьшению ЭДС. Действительно, если левая активная сторона укороченного витка, показанного на рис. 8.5, находится под серединой магнитного полюса, соответствующего максимуму в распределении *основной гармоники* магнитной индукции, то правая сторона смещена от середины полюса, и индуцируемая в этой стороне ЭДС несколько меньше:  $e'_1 < y_1$ . Уменьшение ЭДС за счет укорочения шага обмотки характеризуется *коэффициентом укорочения*

$$k_y = \frac{E_{AX'}}{E_{AX}}, \quad (8.10)$$

где  $E_{AX'}$  — ЭДС катушки с укороченным шагом;  $E_{AX}$  — ЭДС катушки с полным шагом.

Добавим, что обмотка с укороченным шагом характеризуется *нецелым* параметром  $q$  — числом пазов на полюс и фазу.

**Обмоточный коэффициент.** Уменьшение ЭДС, индуцируемой в статоре за счет применения распределенной обмотки и за счет укорочения шага обмотки, учитывается *обмоточным коэффициентом*  $k_{об}$ :

$$k_{об} = k_p k_y. \quad (8.11)$$

Часто пазы ротора или статора делают скошенными (не параллельными валу) для уменьшения высших гармонических ЭДС, вызванных пульсациями магнитного потока из-за наличия зубцов, магнитное сопротивление которых существенно ниже магнитного сопротивления обмотки. Данный фактор дополнительно снижает обмоточный коэффициент.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Каковы функции статора и ротора в машинах переменного тока?
2. Объясните происхождение вращающегося магнитного поля статора трехфазной машины переменного тока при протекании по его обмотке трехфазной системы токов.
3. Опишите конструкцию статора машины переменного тока.
4. Каковы особенности однослойной, двухслойной, сосредоточенной, распределенной обмоток статора? Каковы преимущества распределенной обмотки перед сосредоточенной?
5. Что показывает коэффициент распределения обмотки?
6. От каких параметров зависит частота вращения магнитного поля статора трехфазной машины переменного тока?
7. С какой целью используются обмотки статора с укороченным шагом? Что называется коэффициентом укорочения и обмоточным коэффициентом?

## ТРЕХФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ С ВРАЦАЮЩИМСЯ РОТОРОМ

### 9.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ И КОНСТРУКЦИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Принцип работы асинхронного двигателя.** Поместим внутри системы катушек, рассмотренной в подразд. 8.1, прямоугольный короткозамкнутый виток провода, способный вращаться на оси (рис. 9.1). Конструкция, состоящая из неподвижных катушек и подвижного витка на оси, представляет собой модель асинхронного двигателя. В этой модели система катушек является трехфазной обмоткой статора, а короткозамкнутый виток — обмоткой ротора. Ротор в этой модели состоит только из обмотки. При протекании по катушкам трехфазной системы токов происходят следующие явления.

1. Возникает вращающееся магнитное поле статора (см. подразд. 8.1). Частота вращения поля  $n_1$  в случае одной пары полюсов магнитного поля статора определяется формулой (8.2). Направление вращения поля, найденное в подразд. 8.1, показано на рис. 9.1.

2. Силовые линии вращающегося поля пересекают правую и левую стороны короткозамкнутого витка, и в этих сторонах индуцируется ЭДС (указанные стороны являются *активными*). Направление

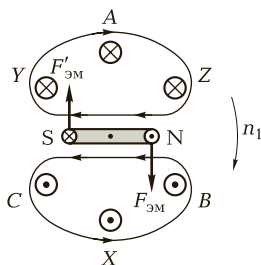


Рис. 9.1. Чертеж, поясняющий принцип работы асинхронного двигателя

ЭДС определим по правилу правой руки (см. подразд. 1.1). Заметим, что это правило применяется к проводнику, движущемуся в магнитном поле. В рассматриваемом случае *движется поле*, а проводники ротора первоначально покоятся относительно статора. Принимая во внимание *относительность движения*, располагаем большой палец правой руки не в направлении вращения поля, а в противоположном направлении, т. е. в направлении движения стороны витка *относительно поля статора*. Линии магнитного поля должны при этом входить в ладонь правой руки. Тогда четыре пальца, перпендикулярные большому пальцу, показывают направление ЭДС: в правой стороне витка ЭДС направлена *на нас*, а в левой стороне *от нас* (эти направления показаны на рис. 9.1). Значение ЭДС определяется формулой (1.1).

3. Под действием ЭДС в короткозамкнутом витке течет ток в направлении ЭДС.

4. На ток, текущий в сторонах витка, действует со стороны магнитного поля статора электромагнитная сила  $F_{эм}$  (сила Ампера), значение которой определяется формулой (1.2). Направление электромагнитной силы находят по правилу левой руки, и *это направление оказывается совпадающим с направлением вращения поля статора*. Вращающий момент, действующий на короткозамкнутый виток, является моментом пары сил: он равен произведению электромагнитной силы, действующей на одну его активную сторону, на расстояние между активными сторонами.

Существенным является тот факт, что *частота вращения ротора асинхронного двигателя  $n_2$  всегда меньше частоты вращения магнитного поля статора  $n_1$* . Действительно, при равенстве частот  $n_2$  и  $n_1$  магнитное поле статора *не пересекает* проводники обмотки ротора, т. е. исчезает причина возникновения вращающего момента. Неравенством значений  $n_2$  и  $n_1$  обосновано название двигателя этого типа: в слове «асинхронный» приставка «а», заимствованная из греческого языка, является отрицательной.

При работе двигателя магнитное поле статора пересекает проводники обмотки ротора с частотой

$$n_s = n_1 - n_2. \quad (9.1)$$

Отношение величины  $n_s$  к частоте вращения поля статора называется *скольжением*; оно обозначается  $s$  и выражается в относительных единицах или процентах:

$$s = \frac{n_s}{n_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \text{ или } s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100. \quad (9.2)$$

**Короткозамкнутый ротор.** Если в рассмотренной модели асинхронного двигателя увеличить число короткозамкнутых витков и распределить их равномерно по окружности, получится *обмотка ротора*, называемая «беличья клетка». Замыкающие (торцевые) проводники такой обмотки выполняются при этом в виде короткозамкнутых колец, которые являются общими для всех активных проводников обмотки — стержней (рис. 9.2, а). Стержни и кольца выполняются из меди или алюминия. Часто обмотки ротора изготавливают путем заливки расплавленного алюминия в закрытые пазы сердечника ротора.

Сердечник ротора, как и магнитопровод трансформатора, набирают из отдельных листов электротехнической стали, т. е. выполняют шихтованным, чтобы ослабить вихревые токи. Лист сердечника показан на рис. 9.2, б, а ротор в сборке — на рис. 9.2, в. Заметим, что вихревые токи в роторе невелики: они определяются частотой перемагничивания сердечника, а последняя зависит от частоты вращения ротора *относительно магнитного поля статора*, т. е. от значения величины  $n_s$  (см. выражение (9.1)). При номинальном скольжении 6 % (см. формулу (9.2)) и частоте напряжения сети 50 Гц получим  $n_s = 3$  Гц. Достаточную изоляцию между листами сердечника обеспечивает оксидная пленка на их поверхностях.

Сердечник ротора насажен на вал, вращающийся в подшипниках качения, которые установлены в переднем и заднем подшипниковых щитах.

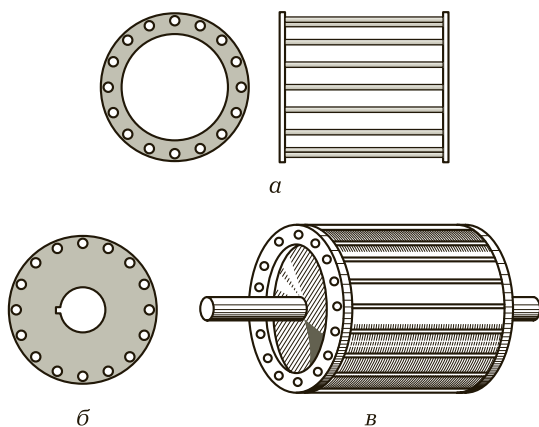


Рис. 9.2. Короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя:

а — обмотка «беличья клетка»; б — лист сердечника ротора; в — ротор в сборке

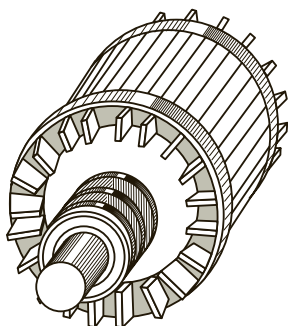


Рис. 9.3. Фазный ротор асинхронного двигателя

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором получили наиболее широкое применение благодаря своей простоте и надежности.

**Фазный ротор.** В двигателях больших мощностей и в специальных случаях применяют фазные роторы. Двигатели с фазным ротором обладают более высокими пусковыми и регулировочными свойствами по сравнению с двигателями с короткозамкнутым ротором (см. далее подразд. 9.7 и 9.8). Обмотка фазного ротора аналогична обмотке статора, т. е. состоит из трех частей — фаз (см. подразд. 8.2). Обмотку ротора соединяют звездой: концы фаз соединяют между собой, а начала подключают к контактным кольцам, жестко укрепленным на валу и изолированным как от вала, так и между собой. Контактные кольца обеспечивают возможность подключения к ним трехфазного пускового реостата, увеличивающего активное сопротивление цепи обмотки ротора (смысл увеличения сопротивления будет выяснен позже при обсуждении вопросов пуска и регулирования частоты вращения двигателя). Фазный ротор показан на рис. 9.3. В передней части видны контактные кольца; по переднему и заднему торцу расположены вентиляционные лопасти.

**Способы соединения обмотки статора.** Сведения о статоре трехфазной машины переменного тока и обмотках статора приведены в подразд. 8.2. Рассмотрим способы соединения фаз обмотки статора асинхронной машины между собой и с трехфазной сетью.

Начала и концы фаз обмотки присоединяются к зажимам коробки выводов (рис. 9.4, а), имеющейся на корпусе машины. Зажимы коробки, к которым присоединяются начала фаз обмотки, маркируются С1, С2, С3 (русская буква «С» обозначает статор); зажимы, к которым присоединяются концы фаз, — С4, С5, С6 соответственно.



Провода, соединяющие концы фаз обмотки с зажимами коробки выводов, показаны на рис. 9.4, *а* пунктирными линиями. Внешние провода от трехфазной сети подключаются к зажимам С1, С2, С3 коробки выводов. Обозначения зажимов коробки продублированы на рисунке у начал и концов фаз обмотки.

Обычно асинхронные двигатели предназначены для включения в сеть на два разных напряжения, отличающихся в  $\sqrt{3}$  раз. На заводской табличке, укрепленной на корпусе машины, номинальные напряжения записывают через дробную черту, например 220/380 В или 380/660 В. Пусть линейное напряжение сети 660 В, а на табличке двигателя указано номинальное напряжение 380/660 В. В этом случае обмотка статора должна быть соединена звездой; тогда к каждой фазе обмотки статора будет приложено напряжение 380 В. Если же линейное напряжение сети 380 В, то обмотка статора этого двигателя должна быть соединена треугольником; при таком способе соединения линейное напряжение сети равно напряжению на фазе нагрузки, т. е. и в этом случае напряжение на фазе обмотки будет равно 380 В.

Для соединения обмотки статора звездой или треугольником в коробке выводов устанавливают переключки. Способ установки переключки, показанный на рис. 9.4, *б*, обеспечивает соединение обмотки звездой, а при установке трех переключек согласно рис. 9.4, *в* получается соединение треугольником. Зажимы коробки С4, С5 и С6 располагают в таком порядке, который исключает пере-

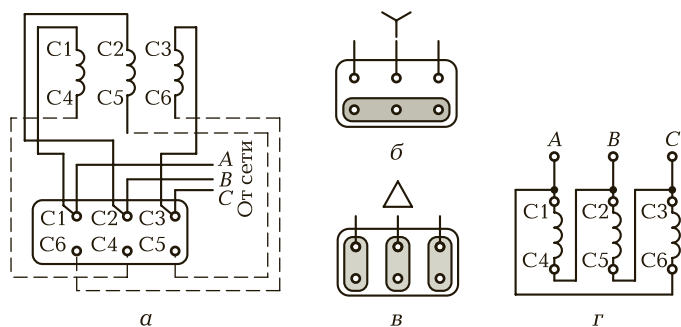


Рис. 9.4. Соединение фаз обмотки статора:

*а* — схема подключения начал и концов фаз обмотки к зажимам коробки выводов; *б* — положение переключки при соединении обмотки звездой; *в*, *г* — соответственно положение переключек и принципиальная схема при соединении обмотки треугольником

сечение переемычек при соединении треугольником. Проследив по рис. 9.4, а все соединения схемы при установке переемычек согласно рис. 9.4, в убедимся, что обмотка статора соединена треугольником (рис. 9.4, г).

## 9.2. УРАВНЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Уравнения напряжений.** Асинхронный двигатель, как и трансформатор, имеет две обмотки. Обмотка статора, на которую подается трехфазная система напряжений, соответствует первичной обмотке трансформатора, а обмотка ротора — вторичной обмотке. Сходство в принципиальных чертах двух названных устройств обуславливает аналогию уравнений, описывающих процессы в них. Поэтому перед изучением данной темы целесообразно повторить материал подраздел. 5.1 и 5.2, в которых, помимо уравнений, вводятся многие понятия, которые будут использоваться здесь без подробных пояснений. В уравнениях, приведенных далее, индекс «1» относится к обмотке статора, а индекс «2» — к обмотке ротора.

Запишем для одной фазы обмотки статора уравнение по второму закону Кирхгофа, аналогичное уравнению (5.3):

$$\underline{U}_1 + \underline{E}_1 + \underline{E}_{\sigma 1} = I_1 R_1, \quad (9.3)$$

где  $\underline{U}_1$  — напряжение (комплексное значение), подаваемое на фазу обмотки;  $\underline{E}_1$  — ЭДС индукции, обусловленная основным магнитным потоком;  $\underline{E}_{\sigma 1}$  — ЭДС индукции, обусловленная потоком рассеяния;  $I_1$  — ток обмотки статора;  $R_1$  — активное сопротивление ее фазы.

Введя понятие индуктивного сопротивления  $X_1$ , обусловленного потоком рассеяния, и выразив ЭДС  $\underline{E}_{\sigma 1}$  по формуле (5.5), перепишем уравнение (9.3):

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + I_1 R_1 + jI_1 X_1. \quad (9.4)$$

В таком виде уравнение показывает, что питающее напряжение компенсирует ЭДС, обусловленную основным потоком, а также падения напряжения на активном и индуктивном сопротивлениях. Уравнения (9.4) и (5.15) идентичны.

Если ротор механически удерживается в неподвижном состоянии (заторможен), то двигатель в наибольшей степени подобен трансформатору, вторичная обмотка которого замкнута накоротко (обмотка короткозамкнутого ротора постоянно замкнута накоротко. Что же касается фазного ротора, то сопротивление его пускового или регулировочного реостата, если он не выведен, можно считать

частью сопротивления обмотки, так что и фазный ротор подобен замкнутой накоротко вторичной обмотке трансформатора). При коротком замыкании напряжение нагрузки  $U_2$  равно нулю. В этом случае ЭДС, индуцируемая в обмотке ротора вращающимся полем статора, компенсирует только падения напряжения на сопротивлениях обмотки — активном  $R_2$  и индуктивном  $X_2$ , обусловленном потоком рассеяния:

$$\underline{E}_2 = I_2 R_2 + j I_2 X_2. \quad (9.5)$$

Записанное уравнение представляет частный случай уравнения (5.14).

При вращении ротора величины, входящие в уравнение (9.5), имеют не такие же числовые значения, как при заторможенном роторе. ЭДС, индуцируемая магнитным полем в проводнике обмотки ротора, пропорциональна скорости пересечения проводника силовыми линиями (см. уравнение (1.1)), и поэтому ЭДС пропорциональна частоте вращения поля статора относительно ротора, на это также указывает формула (2.7). Для заторможенного ротора эта частота равна  $n_1$ , а для вращающегося —  $n_s$  (см. выражение (9.1)). Поэтому для ЭДС фазы обмотки ротора справедлива следующая пропорция:

$$\frac{E_2}{E_{2s}} = \frac{n_1}{n_s},$$

где  $E_{2s}$  — ЭДС, индуцируемая во вращающемся роторе. Согласно выражению (9.2)  $n_s = s n_1$ .

Тогда из записанной пропорции получим

$$E_{2s} = s E_2 \quad (9.6)$$

(значение  $s$  меньше единицы, следовательно, значение  $E_{2s}$  меньше значения  $E_2$ ).

Частота тока ротора  $f_2$  также пропорциональна частоте вращения ротора относительно поля статора, поэтому

$$f_2 = s f_1, \quad (9.7)$$

где  $f_1$  — частота тока статора, которая равна частоте тока ротора, если он заторможен ( $f_2 = f_1$  при  $n_2 = 0$  и  $s = 1$ ).

Индуктивное сопротивление заторможенного ротора, обусловленное потоком рассеяния (индуктивное сопротивление рассеяния) зависит от частоты тока согласно выражению, известному из курса электротехники:  $X_2 = \omega_1 L_2 = 2\pi f_1 L_2$ , где  $\omega_1$  — угловая частота тока статора;  $L_2$  — индуктивность рассеяния ротора. Индуктивное сопротивление рассеяния вращающегося ротора  $X_{2s} = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi s f_1 L_2$ . Таким образом,

$$X_{2s} = sX_2. \quad (9.8)$$

Теперь запишем уравнение ЭДС, индуцируемой во вращающемся роторе, аналогичное уравнению (9.5):

$$\underline{E}_{2s} = I_{2s}R_2 + jI_{2s}X_{2s} \quad (9.9)$$

(пренебрегая незначительным поверхностным эффектом, считаем активное сопротивление  $R_2$  независимым от частоты тока).

**Ток ротора. Замена вращающегося ротора эквивалентным неподвижным.** Выразим из уравнения (9.9) ток, текущий по обмотке вращающегося ротора:

$$\underline{I}_{2s} = \frac{\underline{E}_{2s}}{R_2 + jX_{2s}}; \quad I_{2s} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}},$$

где  $I_{2s}$  — модуль комплексного тока;  $\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}$  — модуль комплексного сопротивления (полное сопротивление) ротора.

Учитывая выражения (9.6) и (9.8), запишем

$$I_{2s} = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + sX_2^2}}. \quad (9.10)$$

Разделив числитель и знаменатель уравнения (9.10) на скольжение  $s$ , получим

$$I_{2s} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}}. \quad (9.11)$$

При увеличении механической нагрузки на валу двигателя происходит увеличение скольжения  $s$  (чем больше тормозной момент, тем меньше частота вращения ротора асинхронного двигателя). При этом увеличивается ЭДС обмотки ротора и индуктивное сопротивление рассеяния, что отражается в уравнении (9.10). Уравнение (9.11) дает другую интерпретацию фактов. Оно представляет дело таким образом, что ЭДС и индуктивное сопротивление не изменяются при изменении скольжения, а активное сопротивление изменяется. Можно сказать, что, записав уравнение (9.11), мы произвели *замену вращающегося ротора эквивалентным неподвижным*. Как видно из этого уравнения, увеличение скольжения эквивалентно уменьшению активного сопротивления. Это подобно тому, что увеличение нагрузки трансформатора, т. е. увеличение тока в его обмотках, происходит при уменьшении сопротивления приемника энергии.

При отсутствии полезной механической нагрузки на валу (при холостом ходе двигателя) скольжение близко к нулю (частота вра-

щения ротора близка к частоте вращения поля статора), а эффективное активное сопротивление ( $R_2/s$ ) принимает очень большое числовое значение (термин «эффективное сопротивление» отражает тот факт, что от этой величины зависит ток ротора, однако реальное активное сопротивление обмотки ротора является величиной постоянной). Этому режиму двигателя аналогичен режим холостой ход трансформатора, когда сопротивление между зажимами его вторичной обмотки стремится к бесконечности.

При замене вращающегося ротора эквивалентным неподвижным уравнение (9.9) переходит в уравнение

$$\underline{E}_2 = \underline{I}_{2s} \frac{R_2}{s} + j \underline{I}_{2s} X_2. \quad (9.12)$$

Ранее было выяснено, что обмотка статора, по которой протекает трехфазная система токов частотой  $f_1$ , создает магнитное поле, вращающееся относительно статора с частотой  $n_1$ . Подобным образом и токи ротора частотой  $f_2 = sf_1$  создают поле, вращающееся относительно ротора с частотой  $n_s$  (см. выражение (9.1)). Очевидно, что это поле вращается *относительно статора* с частотой, равной сумме частот  $n_s$  и  $n_2$ . Из выражения (9.1) видно, что эта сумма равна частоте  $n_1$ . *Таким образом, магнитные поля статора и ротора вращаются относительно статора с одной и той же частотой и, следовательно, находятся в покое относительно друг друга.*

### 9.3. ПРИВЕДЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБМОТКИ РОТОРА К ОБМОТКЕ СТАТОРА

**Приведение ЭДС фазы обмотки ротора.** Продолжим сравнение параметров, характеризующих асинхронный двигатель, с параметрами трансформатора.

Коэффициент трансформации трансформатора определяется выражениями (4.6). Введем понятие *коэффициента трансформации ЭДС*  $k_e$  асинхронного двигателя как отношение ЭДС фазы обмотки статора  $E_1$  к ЭДС фазы обмотки заторможенного ротора  $E_2$ . Это отношение, однако, не равно отношению чисел витков, поскольку применение распределенных обмоток и укорочение шага обмотки уменьшает ЭДС. Мерой ее уменьшения является обмоточный коэффициент, определяемый выражением (8.11):  $k_{об} = k_p k_y$  (смысл коэффициента распределения  $k_p$  и коэффициента укорочения  $k_y$  дан в подразд. 8.2). Тогда для ЭДС фазы обмоток статора и заторможенного ротора справедливы следующие выражения:

$$E_1 = 4,44w_1f_1\Phi k_{\sigma 01}; \quad E_2 = 4,44w_2f_1\Phi k_{\sigma 02}, \quad (9.13)$$

где  $\Phi$  — постоянный по модулю магнитный поток статора, вращающийся с частотой  $n_1$ . Данные выражения записаны на основе выражений ЭДС обмоток трансформатора (4.5).

**П р и м е ч а н и е.** В обмотках трансформатора, питающегося от сети синусоидального напряжения, ЭДС создается синусоидальным магнитным потоком с амплитудой  $\Phi_{0m}$ . В обмотках асинхронного двигателя ЭДС создается вращающимся потоком, неизменным по модулю. Известно, что проекция вращающегося вектора на какую-либо ось изменяется по закону синуса, причем амплитуда проекции равна модулю вектора. Таким образом, характер изменения магнитного потока через отдельный виток обмотки трансформатора и через отдельный виток обмотки статора или ротора асинхронного двигателя один и тот же. Отсюда следует правомерность выражений (9.13).

Согласно изложенному ранее коэффициент трансформации ЭДС асинхронного двигателя выражается следующим образом:

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{k_{\sigma 01}w_1}{k_{\sigma 02}w_2}. \quad (9.14)$$

Для удобства анализа процессов в асинхронном двигателе и простоты построения его схемы замещения и векторной диаграммы выполняют *приведение параметров обмотки ротора к числу витков и числу фаз обмотки статора*, аналогично тому, как это делают для трансформаторов (см. подразд. 5.2). Обязательным условием приведения является сохранение значений потребляемой мощности, мощности потерь и МДС.

Приведенное значение ЭДС фазы ротора  $E_2'$  определяется с использованием выражения (9.14):

$$E_2' = E_1 = E_2 k_e = E_2 \frac{k_{\sigma 01}w_1}{k_{\sigma 02}w_2} \quad (9.15)$$

(ср. с выражением (5.19)).

**Приведение тока и сопротивлений ротора.** Аналогично тому, как это делалось в подразд. 5.2, можно прийти к выводу, что ток обмотки статора  $I_1$  создает магнитный поток, практически неизменный при изменении самого тока (ток изменяется при изменении нагрузки на валу двигателя). Действительно, поскольку падение напряжения  $I_1 R_1$  на активном сопротивлении обмотки статора и падение напряжения  $I_1 X_1$  на индуктивном сопротивлении рассеяния сравнительно

невелики по сравнению с ЭДС фазы обмотки статора  $E_1$ , обусловленной основным магнитным потоком, то из уравнения (9.4) следует приблизительное равенство  $\underline{U}_1 \approx -\underline{E}_1$ , где  $\underline{U}_1$  — комплекс фазного напряжения сети (см. также равенство (5.1)). Таким образом, при неизменном напряжении питания практически неизменным будет магнитный поток, создающий ЭДС  $E_1$ .

При холостом ходе асинхронного двигателя, т. е. при значении скольжения  $s$ , близком к нулю (когда ротор вращается почти со скоростью вращения поля статора), ток холостого хода статора  $I_0$  создает магнитодвижущую силу  $I_0 m_1 k_{061} w_1$ , где число фаз статора  $m_1 = 3$ . Ток ротора в режиме холостого хода весьма мал, что видно из уравнений (9.10) и (9.11).

В режиме нагрузки двигателя (при  $s \neq 0$ ) в создании магнитного потока принимает участие как ток статора, так и ток ротора. Общая МДС определяется из суммы комплексных МДС обмоток обеих частей машины ( $\underline{I}_1 m_1 k_{061} w_1 + \underline{I}_2 s m_2 k_{062} w_2$ ). Поскольку в режиме нагрузки магнитный поток почти такой же, как при холостом ходе, можем записать

$$\underline{I}_1 m_1 k_{061} w_1 + \underline{I}_2 s m_2 k_{062} w_2 = \underline{I}_0 m_1 k_{061} w_1. \quad (9.16)$$

Записанное равенство представляет собой уравнение МДС асинхронного двигателя, аналогичное уравнению МДС трансформатора (5.16).

Поясним смысл числа фаз обмотки ротора  $m_2$ . Обмотка фазного ротора аналогична обмотке статора, и число фаз обеих обмоток равно трем. Что касается короткозамкнутого ротора, то за число фаз его обмотки можно принять общее число ее витков, каждый из которых включает в себя два стержня. Другими словами, число фаз такого ротора равно числу пар стержней «беличьей клетки». Тогда очевидно, что число витков  $w_2$  одной фазы равно единице (в качестве числа фаз иногда принимают число стержней, тогда число витков фазы получается равным 0,5, потому что произведение  $m_2 w_2$  должно быть таким же).

Разделив уравнение (9.16) на  $m_1 k_{061} w_1$ , получим:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 s \frac{m_2 k_{062} w_2}{m_1 k_{061} w_1} = \underline{I}_0; \quad \underline{I}_1 = -\underline{I}_2 s \frac{m_2 k_{062} w_2}{m_1 k_{061} w_1} + \underline{I}_0.$$

Последнее уравнение имеет следующий смысл: ток статора компенсирует размагничивающее действие тока ротора и создает неизменный магнитный поток.

Введем обозначение

$$k_i = \frac{m_1 k_{061} w_1}{m_2 k_{062} w_2}. \quad (9.17)$$

Величина  $k_i$  представляет собой коэффициент трансформации тока. С учетом этого обозначения перепишем предыдущее уравнение:

$$\underline{I}_1 = -\frac{\underline{I}_{2s}}{k_i} + \underline{I}_0.$$

Введем понятие приведенного тока ротора  $\underline{I}'_{2s}$ :

$$\underline{I}'_{2s} = \frac{\underline{I}_{2s}}{k_i} \quad (9.18)$$

(ср. с выражением (5.17)).

Теперь ток статора может быть записан в следующем виде:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}'_{2s} + \underline{I}_0, \quad (9.19)$$

что практически повторяет уравнение (5.24).

Сравнивая выражения (9.17) и (9.14), получаем связь между коэффициентами трансформации ЭДС и тока:

$$k_i = \frac{m_1}{m_2} k_e. \quad (9.20)$$

При определении приведенного активного сопротивления обмотки ротора  $R'_2$  исходим из того, что мощности электрических потерь в исходной и приведенной обмотках должны быть одинаковыми. Поэтому

$$m_2 I_{2s}^2 R_2 = m_1 (I'_{2s})^2 R'_2; \quad I_{2s}^2 R_2 = \frac{m_1}{m_2} \frac{I_{2s}^2}{k_i^2} R'_2,$$

где использовано выражение (9.18). Отсюда найдем

$$R'_2 = R_2 \frac{m_2}{m_1} k_i^2.$$

Учитывая связь между коэффициентами трансформации (9.20), получим другие выражения:

$$R'_2 = R_2 \frac{m_1}{m_2} k_e^2, \quad \text{или} \quad R'_2 = R_2 k_e k_i \quad (9.21)$$

(сравнить с выражением (5.21) для трансформатора).

При определении приведенного индуктивного сопротивления рассеяния обмотки ротора  $X'_2$  основываемся на том, что угол сдвига фаз между ЭДС и током исходного и приведенного двигателя должен быть одним и тем же. Это условие выполняется, если отношение приведенных значений индуктивного и активного сопротивлений равно отношению исходных значений. Поэтому приведенное индуктивное сопротивление связано с исходным так же, как приведенное активное сопротивление связано с исходным активным:



$$X'_2 = X_2 \frac{m_1}{m_2} k_e^2, \text{ или } X'_2 = X_2 k_e k_i. \quad (9.22)$$

Теперь перепишем уравнение напряжений фазы обмотки ротора (9.12) через приведенные величины:

$$\underline{E}'_2 = \underline{I}'_{2s} \frac{R'_2}{s} + j \underline{I}'_{2s} X'_2. \quad (9.23)$$

**Векторная диаграмма и схема замещения асинхронного двигателя.** Векторная диаграмма одной фазы двигателя строится на основе уравнения токов (9.19) и уравнений напряжений (9.4) и (9.23).

Первые два из указанных уравнений имеют тот же вид, что и соответствующие уравнения, описывающие процессы в трансформаторе. Однако ток холостого хода асинхронного двигателя составляет 20 ... 35 % номинального тока, в то время как у трансформатора это значение составляет 5 ... 10 %.

Причина такого явления заключается в том, что в магнитной системе двигателя имеется воздушный зазор, который в значительной степени увеличивает магнитное сопротивление пути прохождения магнитного потока, и для получения заданного потока (он определяется приложенным напряжением) требуется больший ток намагничивания, чем в трансформаторе. Уравнение (9.23) отличается от урав-

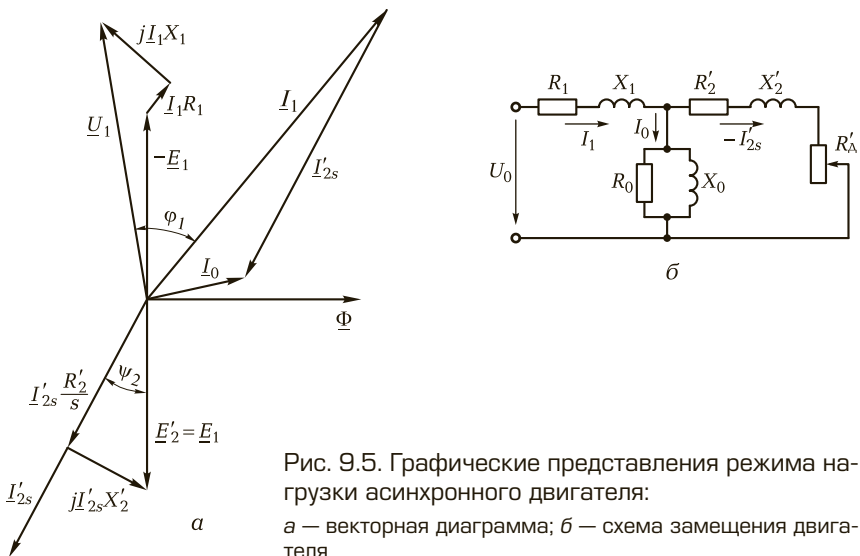


Рис. 9.5. Графические представления режима нагрузки асинхронного двигателя:

а — векторная диаграмма; б — схема замещения двигателя

нения (5.23) отсутствием напряжения  $U'_2$  (несмотря на то, что сопротивление  $R'_2/s$  изменяется при изменении нагрузки на валу двигателя, в уравнении (9.23) оно играет роль активного сопротивления короткого замыкания, а не сопротивления нагрузки). Векторную диаграмму асинхронного двигателя (рис. 9.5, а) полезно сравнить с векторной диаграммой трансформатора (см. рис. 5.4).

Обратим внимание на два обстоятельства. Во-первых, для большей аналогии с диаграммой трансформатора диаграмма токов асинхронного двигателя построена в соответствии с уравнением токов в виде  $I_1 + I'_{2s} = I_0$ , являющимся прямым следствием из уравнения (9.19). (В такой записи ток холостого хода, близкий к току намагничивания, представляется как результат совместного действия МДС статора и ротора.)

Во-вторых, на диаграмме трансформатора вектор  $U'_2$  построен как сумма трех векторов  $E'_2$ ,  $(-I'_2 R'_2)$  и  $(-jI'_2 X'_2)$ , что соответствует уравнению напряжений вторичной обмотки в виде (5.23). При этом вектор  $(-I'_2 R'_2)$  имеет направление, противоположное направлению вектора  $I'_2$ . На диаграмме асинхронного двигателя согласно уравнению (9.23) вектор  $E'_2$  представлен как сумма векторов  $I'_{2s} R'_2/s$  и  $jI'_{2s} X'_2$ .

Угол сдвига фаз между током и напряжением принято обозначать буквой  $\varphi$ , а угол сдвига фаз между током и ЭДС чаще всего обозначают буквой  $\psi$ . В соответствии с этим на рис. 9.5, а использованы обозначения  $\varphi_1$  и  $\psi_2$ .

Векторной диаграмме асинхронного двигателя отвечает схема замещения, показанная на рис. 9.5, б, в которой электромагнитная связь статора и ротора заменена электрической (сравнить с рис. 5.5, б). Сделаем следующие выводы по схеме замещения.

1. При построении схемы замещения использовано уравнение токов в виде (9.19), представляющим ток статора разветвляющимся на ток холостого хода и ток ротора.

2. Ток холостого хода  $I_0$ , в свою очередь, представлен разветвляющимся в соответствии с уравнением (5.8) на активную составляющую  $I_{0a}$ , обусловленную магнитными потерями, и реактивную составляющую  $I_{0p}$ , определяющую поток намагничивания. Необходимые рассуждения, касающиеся ветви схемы замещения с током  $I_0$  и элементов этой ветви с сопротивлениями  $R_0$  и  $X_0$ , приводятся при рассмотрении векторной диаграммы и схемы замещения трансформатора в режиме холостого хода (см. подразд. 5.1).

3. Аналогию схем замещения асинхронного двигателя и трансформатора дополняет представление активного сопротивления  $R'_2/s$  в виде суммы двух сопротивлений:

$$\frac{R'_2}{s} = R'_2 + R'_A,$$

где  $R'_A$  — добавочное сопротивление, которое представляет собой приращение сопротивления короткого замыкания вращающегося ротора к сопротивлению короткого замыкания неподвижного ротора  $R'_2$  (см. подразд. 9.2).

На схеме замещения двигателя сопротивление  $R'_A$  занимает то же место, что и сопротивление нагрузки на схеме замещения трансформатора. Получим из последнего уравнения связь добавочного сопротивления  $R'_A$  с сопротивлением  $R'_2$ :

$$R'_A = R'_2 \frac{1-s}{s}. \quad (9.24)$$

Уравнение (9.24) показывает, что добавочное сопротивление уменьшается с увеличением скольжения. Увеличение скольжения происходит при увеличении механической нагрузки; одновременно при этом увеличивается ток ротора. Продолжая увеличивать механическую нагрузку, мы добьемся полной остановки ротора ( $s = 1$ ). Добавочное сопротивление при этом становится равным нулю, чего и следует ожидать, поскольку при отсутствии вращения активное сопротивление правой ветви схемы замещения должно быть минимальным и равным  $R'_2$ .

## 9.4. КПД И ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Мощность  $P_1$ , потребляемая двигателем из сети, определяется числом фаз обмотки статора  $m_1$ , напряжением  $U_1$ , подаваемым на фазу обмотки, током  $I_1$  в фазе обмотки и углом сдвига фаз между током и напряжением  $\varphi_1$ :

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1. \quad (9.25)$$

Полезная мощность двигателя  $P_2$  — это механическая мощность на валу, которая меньше потребляемой мощности на величину суммарной мощности потерь  $\Sigma P$ :  $P_2 = P_1 - \Sigma P$ . Долю, которую составляет полезная мощность от потребляемой мощности, определяет коэффициент полезного действия двигателя  $\eta$ , рассчитываемый в относительных единицах или в процентах по общей формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \text{ или } \eta = \frac{P_2}{P_1} 100. \quad (9.26)$$

Используются и другие формы выражения КПД, аналогичные тем, которые приводятся в цепочке равенств (3.5) для двигателя постоянного тока.

У двигателей мощностью от 1 до 20 кВт КПД при номинальной нагрузке составляет 75...90 %; у более мощных двигателей он доходит до 95 %.

В суммарную мощность потерь входят:

- мощность электрических потерь в обмотках статора  $P_{об1} = m_1 I_1^2 R_1$ ;
- мощность магнитных потерь в сердечнике статора (потери в стали на гистерезис и вихревые токи)  $P_{с1}$ ;
- мощность электрических потерь в обмотках ротора  $P_{об2} = m_2 I_2^2 R_2$ ;
- мощность механических потерь  $P_{мех.п}$ , обусловленных трением в подшипниках и сопротивлением воздуха; в двигателе с фазным ротором механические потери обусловлены также трением щеток о контактные кольца ротора;
- мощность добавочных потерь  $P_{доб}$ , обусловленных, в частности, пульсацией магнитной индукции в зубцах и наличием высших гармоник МДС. Добавочные потери трудно учесть; обычно их принимают равными 0,5 % от потребляемой мощности  $P_1$ .

В приведенном перечне отсутствует мощность магнитных потерь в роторе. Дело в том, что сердечник ротора в рабочем режиме двигателя перемагничивается с весьма малой частотой  $f_2 = sf_1$  (см. формулу (9.7)), поэтому потери от гистерезиса и вихревых токов в нем незначительны.

Электрические потери  $P_{об1}$  и  $P_{об2}$ , а также добавочные потери  $P_{доб}$  зависят от нагрузки двигателя, т. е. от токов в обмотках ротора и статора, и поэтому являются *переменными потерями*. Магнитные  $P_{с1}$  и механические  $P_{мех.п}$  потери почти не зависят от нагрузки, за исключением случая, когда при изменении нагрузки значительно изменяется частота вращения и, значит, значительно изменяется частота перемагничивания магнитной системы двигателя.

*Электромагнитная мощность  $P_{эм}$*  — это мощность, которая передается ротору вращающимся магнитным полем статора через воздушный зазор. Согласно этому определению мощность  $P_{эм}$  меньше потребляемой мощности на величину потерь в обмотке и сердечнике статора:

$$P_{эм} = P_1 - (P_{об1} + P_{с1}). \quad (9.27)$$

Мощность  $P_2'$ , развиваемая вращающимся ротором, меньше электромагнитной мощности на величину электрических потерь в роторе ( $P_2' = P_{эм} - P_{об2}$ ) и больше полезной мощности на валу на величину механических потерь:  $P_2' = P_2 + P_{мех.п.}$

## 9.5. МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Электромагнитный момент.** Электромагнитный момент, развиваемый двигателем, определяется электромагнитной мощностью  $P_{эм}$ , передаваемой ротору вращающимся полем статора (см. подразд. 9.4) и угловой скоростью вращения поля  $\Omega_1$ :

$$M = \frac{P_{эм}}{\Omega_1}. \quad (9.28)$$

**Примечания:**

1. При поступательном движении тела, на которое действует сила  $F$ , мощность этой силы определяется как  $P = Fv$ , где  $v$  — мгновенная скорость движения. Формула мощности вращающегося тела, на которое действует момент  $M$ , получается заменой величин, характеризующих поступательное движение, на соответствующие величины, характеризующие вращение:  $P = M\Omega$ . Отсюда ясна формула (9.28). Следует учесть, однако, что эта формула определяет момент не на валу двигателя, а момент, передаваемый ротору через воздушный зазор.

2. Связь между угловой скоростью  $\Omega_1$  и частотой вращения  $n_1$  дается формулой (3.13).

Мощность  $P_1$ , потребляемая двигателем из сети, определяется выражением (9.25). Аналогичное выражение можно записать для электромагнитной мощности  $P_{эм}$ , передаваемой ротору:  $P_{эм} = m_2 E_2 I_{2s} \cos \psi_2$ . Здесь учтена замена вращающегося ротора эквивалентным неподвижным (см. подразд. 9.2.2), т. е. ЭДС в обмотке ротора считается независимой от скольжения, а ток в роторе  $I_{2s}$  выражается формулой (9.11). Используя приведение величин к обмотке статора (см. подразд. 9.3), запишем:  $P_{эм} = m E_2' I_{2s}' \cos \psi_2$ . Правомерность выражения электромагнитной мощности может быть уяснена из сопоставления верхней и нижней частей векторной диаграммы, показанной на рис. 9.5, а, с выражением (9.25) и с выражением электромагнитной мощности. При этом следует иметь в виду, что действие ЭДС  $E_2$  в фазе цепи ротора эквивалентно наличию источника с напряжением, равным  $E_2$ .

Из выражения для ЭДС  $E_1$  (9.13) и из равенства приведенной ЭДС ротора  $E'_2$  и ЭДС статора  $E_1$  (см. формулу (9.15)), следует:  $E'_2 = 4,44w_1f_1\Phi k_{об1}$ . Тогда для электромагнитной мощности имеем

$$P_{эм} = m_1 4,44w_1f_1\Phi k_{об1} I'_{2s} \cos\psi_2.$$

Угловая скорость вращения поля статора  $\Omega_1$  пропорциональна частоте  $f_1$ , которую имеют ЭДС  $E_1$  и приведенная ЭДС  $E'_2$  (см. выражения (3.13) и (8.4)). Тогда, если разделить выражение электромагнитной мощности на угловую скорость  $\Omega_1$ , получим согласно формуле (9.28) выражение электромагнитного момента  $M$ , в котором величины  $\Phi$ ,  $I'_{2s}$  и  $\cos\psi_2$  являются переменными, а остальные величины (в том числе, частота вращения поля) определяются конструктивными данными машины, и эти величины можно объединить в коэффициенте  $C$ . Итак,

$$M = C\Phi I'_{2s} \cos\psi_2. \quad (9.29)$$

Записанное выражение (9.29) аналогично выражению электромагнитного момента двигателя постоянного тока (3.10), в котором электромагнитная мощность также передается через воздушный зазор к вращающейся части машины (в двигателе постоянного тока вращающейся частью является якорь).

**Анализ механической характеристики.** Механическая характеристика асинхронного двигателя — это зависимость электромагнитного момента  $M$  от частоты вращения ротора  $n_2$  (см. также подразд. 3.3). Вместо частоты вращения поля в качестве аргумента часто выбирают скольжение  $s$ , связанное с частотой выражением (9.2), которое удобно привести к виду

$$s = 1 - \frac{n_2}{n_1}. \quad (9.30)$$

Прежде всего отметим два важных факта.

1. Ранее указывалось, что магнитный поток  $\Phi$  статора почти не зависит от нагрузки асинхронного двигателя и пропорционален напряжению питания  $U_1$  (см. подразд. 9.3). С другой стороны, ток ротора  $I'_{2s}$  также пропорционален напряжению питания, что следует из уравнения (9.23) с учетом равенства  $E'_2 = E_1$  и приблизительного равенства  $E_1 \approx U_1$ . В таком случае согласно выражению (9.29) *электромагнитный момент  $M$  пропорционален квадрату напряжения  $U_1^2$ .*

2. Если напряжение питания не изменяется, то, как видно из выражения (9.29), электромагнитный момент пропорционален произведению  $I'_{2s} \cos\psi_2$ , которое представляет *активную составляющую тока ротора.*

Для анализа зависимости электромагнитного момента от скольжения рассмотрим зависимости от скольжения величин  $I_{2s}$  и  $\cos\psi_2$ .

Перепишем выражения (9.10) и (9.11):

$$I_{2s} = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + sX_2^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}}.$$

Видно, что при скольжении, равном нулю (когда ротор вращается синхронно с полем статора), ток ротора равен нулю; тогда и электромагнитный момент согласно формуле (9.29) равен нулю. При увеличении скольжения ток ротора увеличивается.

Косинус угла сдвига фаз между током ротора и ЭДС, индуцируемой в роторе, определим на основании рис. 9.5, а:

$$\cos\psi_2 = \frac{\frac{R_2}{s}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}}. \quad (9.31)$$

Таким образом, при скольжении, равном нулю,  $\cos\psi_2$  равен единице. При увеличении скольжения происходит убывание  $\cos\psi_2$ . При скольжении, большем единицы,  $\cos\psi_2$  продолжает убывать. Математически можно рассмотреть случай стремления скольжения к бесконечности;  $\cos\psi_2$  при этом стремится к нулю (бесконечность во второй дроби последнего выражения). Убывание  $\cos\psi_2$  согласно формуле (9.29) влияет на электромагнитный момент также в сторону убывания, и в пределе момент  $M$  вместе с  $\cos\psi_2$  стремится к нулю.

Поясним, что скольжение принимает значение, большее единицы, в случае если частота вращения ротора  $n_2$  (см. формулу (9.2) или (9.30)) принимает отрицательное значение. Это произойдет, если в процессе работы двигателя изменить порядок следования фаз обмотки статора, поменяв местами два каких-либо провода, с помощью которых обмотка статора подключена к трехфазной сети. Направление вращения поля статора изменится на противоположное, и на ротор будет действовать тормозной момент. Таким образом реализуется метод торможения противовключением (см. подразд. 9.9). Конечно, если изменить порядок следования фаз обмотки статора, когда ротор находится в покое ( $s = 1$ ), будет происходить разгон двигателя в направлении вращения поля, и скольжение будет меньше единицы.

Итак, согласно изложенному ранее электромагнитный (вращающий) момент принимает нулевое значение как при скольжении, равном нулю, так и при скольжении, формально стремящемся к бес-

конечности. Это означает, что при увеличении скольжения от нуля момент  $M$  сначала увеличивается, затем достигает максимального значения  $M_{\max}$ , после чего снова уменьшается. Другими словами, в интервале значений скольжения от нуля до критического  $s_{\text{кр1}}$  при котором момент максимален, характер изменения момента определяется возрастанием тока ротора  $I_{2s}$  ( $\cos\psi_2$  при этом близок к единице и изменяется медленно). Напротив, при больших скольжениях, превышающих критическое значение  $s_{\text{кр1}}$ , изменение момента определяется убыванием  $\cos\psi_2$ : частота тока ротора  $f_2$  при этом значительна, ток ротора имеет большую реактивную составляющую (напомним, что вращающий момент определяется активной составляющей тока).

Описанный характер изменения электромагнитного момента при изменении скольжения иллюстрируется на рис. 9.6, где показаны две механические характеристики асинхронного двигателя при двух различных значениях активного сопротивления цепи ротора (зависимость момента от активного сопротивления обсуждается далее). Область отрицательных скольжений, когда частота вращения ротора превышает частоту вращения поля статора, соответствует генераторному режиму асинхронного двигателя и рассматривается в подразд. 9.9.

Электромагнитный момент при неподвижном роторе, т. е. при скольжении, равном единице, представляет собой пусковой момент  $M_{\text{пуск}}$ .

Точки, соответствующие *номинальному моменту*  $M_{\text{ном}}$ , отмечены на восходящих участках механических характеристик — в области устойчивой работы двигателя (вопрос устойчивости работы двигателя на примере машины постоянного тока разобран в подразд. 3.3;

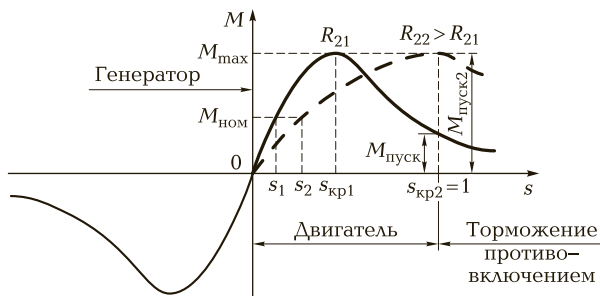


Рис. 9.6. Механические характеристики асинхронного двигателя при разных сопротивлениях цепи ротора



применяя приведенные там рассуждения к асинхронному двигателю, нужно иметь в виду, что восходящему участку зависимости момента от скольжения соответствует нисходящий участок зависимости момента от частоты вращения ротора).

Отношение пускового момента к номинальному  $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$  обычно составляет  $0,8 \dots 1,5$  и называется *кратностью пускового момента*.

Отношение максимального момента к номинальному  $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$  обычно находится в пределах  $1,6 \dots 2,5$  (в двигателях специального назначения  $2,5 \dots 3,0$ ) и называется *перегрузочной способностью* двигателя.

**Зависимость электромагнитного момента от активного сопротивления цепи ротора.** Выражение максимального момента  $M_{\text{max}}$  можно получить путем исследования функции зависимости момента от скольжения, т. е. функции (9.29), в которой переменные величины  $I'_{2s}$  и  $\cos\psi_2$  следует выразить через скольжение. В ходе исследования функции выясняется:

- максимальное значение  $M_{\text{max}}$  функции  $M(s)$  не зависит от активного сопротивления цепи ротора;
- при увеличении активного сопротивления цепи ротора электромагнитный момент принимает свое максимальное значение при все большем значении скольжения.

Оба факта иллюстрируются на рис. 9.6. Откуда видно, что при увеличении активного сопротивления цепи ротора увеличивается пусковой момент и при надлежащем выборе активного сопротивления пусковой момент становится равным максимальному. Каким образом регулируют активное сопротивление, обсуждается в подразд. 9.8.

## 9.6. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рабочие характеристики асинхронного двигателя — это зависимости от полезной мощности  $P_2$  на валу различных величин: частоты вращения ротора  $n_2$ ; скольжения  $s$ ; электромагнитного момента  $M$  или полезного момента  $M_2$ ; тока обмотки статора  $I_1$ ; потребляемой мощности  $P_1$ ; коэффициента мощности  $\cos\phi_1$ ; коэффициента полезного действия  $\eta$ . Характеристики получают экспериментально *при естественных условиях работы* двигателя: двигатель нерегулируемый, напряжение питания  $U_1$  и частота напряжения  $f_1$  имеют неиз-

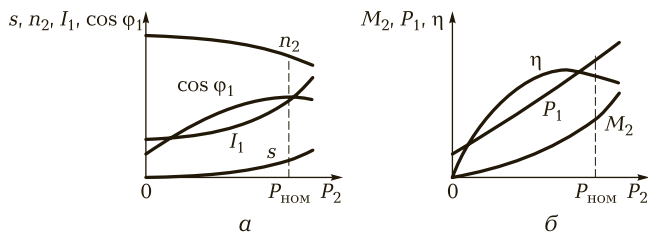


Рис. 9.7. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

менные значения. Рабочие характеристики показаны на рис. 9.7. Чтобы избежать пересечения большого числа линий, характеристики разбиты на две группы, показанные на отдельных координатных плоскостях (см. рис. 9.7, а, б).

Частота вращения ротора  $n_2$  уменьшается при повышении нагрузки на валу (т. е. при повышении мощности  $P_2$ ). На интервале нагрузки от нулевой до номинальной это уменьшение обычно находится в пределах 5 % (*жесткая характеристика*, как у двигателя постоянного тока параллельного возбуждения, показанная на рис. 3.4, б).

Скольжение  $s$  при увеличении нагрузки на валу двигателя возрастает вследствие уменьшения частоты вращения. Зависимость скольжения от частоты вращения задается формулой (9.2). С учетом (8.4) легко получить еще одно полезное выражение, показывающее связь между частотой вращения, скольжением, частотой напряжения питания и числом пар полюсов машины:

$$n_2 = \frac{60f_1(1-s)}{p}. \quad (9.32)$$

*Тормозной (полезный) момент на валу  $M_2$*  выражается по аналогии с формулой (9.28):

$$M_2 = \frac{P_2}{\Omega_2} = \frac{P_2}{2\pi f_{\text{вр}}} = \frac{30P_2}{\pi n_2}, \quad (9.33)$$

где  $\Omega_2$  — угловая скорость вращения ротора, рад/с;  $f_{\text{вр}}$  — частота вращения ротора, об/с (учтено, что  $n_2$  (об/мин) =  $60f_{\text{вр}}$ ).

За счет некоторого уменьшения частоты вращения  $n_2$  с ростом нагрузки  $P_2$  увеличение тормозного (полезного) момента  $M_2$  происходит быстрее, чем увеличение полезной мощности на валу, и кривая тормозного момента незначительно отклоняется вверх от прямой линии (сравните с кривой полезного момента двигателя постоянно-го тока, см. рис. 3.4, б).

Сумма полезного момента  $M_2$  и момента холостого хода  $M_0$ , идущего на преодоление механических потерь двигателя, равна *вращающему (электромагнитному) моменту*  $M$ , развиваемому двигателем при стационарной работе (т. е. при отсутствии ускорений):

$$M = M_2 + M_0. \quad (9.34)$$

Ток  $I_1$ , потребляемый двигателем из сети, неравномерно изменяется при увеличении нагрузки на валу. При небольшой нагрузке ток возрастает медленно, а при значительной нагрузке — более резко, компенсируя сильное увеличение активных потерь в обмотках статора и ротора.

Изменение коэффициента мощности  $\cos\varphi_1$  при изменении нагрузки на валу двигателя происходит следующим образом. При холостом ходе (при  $s \approx 0$ )  $\cos\varphi_1$  мал, так как активная составляющая тока статора, расходуемая на покрытие потерь в машине, мала по сравнению с реактивной составляющей этого тока, создающей магнитный поток. При увеличении нагрузки на валу коэффициент мощности повышается, достигая наибольшего значения (0,8... 0,9) за счет роста активной составляющей тока статора. При очень больших нагрузках заметно возрастает скольжение и частота тока ротора. По этой причине увеличивается реактивное сопротивление обмотки ротора и происходит некоторое уменьшение  $\cos\varphi_1$ .

*Потребляемая мощность*  $P_1$  определяется выражением (9.25). При постоянном напряжении питания она зависит только от активной составляющей тока статора  $I_1 \cos\varphi_1$ . Величины  $I_1$  и  $\cos\varphi_1$ , взятые по отдельности, изменяются неравномерно при изменении полезной мощности  $P_2$ . Произведение же этих величин, как и потребляемая мощность  $P_1$ , имеет примерно линейную зависимость от полезной мощности. Незначительное отклонение кривой  $P_1$  вверх объясняется увеличением потерь в меди обмоток статора и ротора с увеличением нагрузки.

КПД  $\eta$  имеет такую же зависимость от полезной мощности, как у любой электрической машины или трансформатора. При холостом ходе (т. е. при отсутствии полезной нагрузки) КПД равен нулю. КПД принимает наибольшее значение при нагрузке, для которой постоянные потери равны переменным (см. подразд. 5.4).

## 9.7. ПУСК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Пуск короткозамкнутого двигателя непосредственным включением в сеть.** Такой пуск весьма распространен. В момент пуска ротор

неподвижен, и силовые линии магнитного поля статора пересекают проводники обмотки ротора с большой частотой. По этой причине в обмотке ротора наводится ЭДС большого значения, и по ней, а также по обмотке статора течет ток, превышающий номинальный в 5—7 раз. Большой пусковой ток вызывает уменьшение напряжения в сети, что влияет на работу других приемников энергии. Данный способ пуска можно применять при большой мощности сети, когда пусковой ток не вызывает падение напряжения в сети более 10... 15 %. Современные энергетические системы обычно имеют такие мощности, что в большинстве случаев прямой пуск асинхронных двигателей оказывается возможным. В настоящее время асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором проектируются с таким расчетом, чтобы они по условиям нагревания обмоток и по величине возникающих при пуске электродинамических сил, действующих на обмотки, допускали прямой пуск. Нередко таким способом осуществляется пуск двигателей мощностью в тысячи киловатт.

При разгоне двигателя скольжение уменьшается от единицы до значения, близкого к нулю. При этом уменьшаются ток ротора согласно уравнению (9.11) и ток статора согласно уравнению (9.19).

Помимо большого пускового тока пуск непосредственным включением имеет и другой недостаток — малый пусковой момент. Действительно, при неподвижном роторе в его обмотке индуцируется ЭДС, частота которой равна частоте тока сети; следовательно, индуктивное сопротивление обмотки ротора при пуске велико. Поэтому активная составляющая тока ротора, определяющая вращающий момент, оказывается малой (см. уравнение (9.29)). Таким образом, пуск двигателя обычного исполнения непосредственным включением в сеть может выполняться либо при отсутствии нагрузки на валу, либо при малой нагрузке.

**Переключение обмотки статора короткозамкнутого двигателя со звезды на треугольник.** Применяется как один из способов пуска *при пониженном напряжении*. Все способы пуска, в которых на обмотку статора подается пониженное напряжение, позволяют значительно снизить пусковой ток, но при этом снижается и пусковой момент.

Переключение со звезды на треугольник может применяться только тогда, когда при работе двигателя обмотка его статора должна быть соединена в треугольник, т. е. когда каждая фаза обмотки статора рассчитана на линейное напряжение сети (см. подразд. 9.1). При пуске обмотку статора соединяют в этом случае звездой, а после разгона — треугольником; причем выполняется это переключателем,

а не перемычками, показанными на рис. 9.4, б, в. Когда обмотка статора соединена в звезду, фазные напряжения и ток будут в  $\sqrt{3}$  раз меньше, чем при соединении в треугольник. Тогда *пусковой ток (линейный) при соединении обмоток в звезду окажется в 3 раза меньше, чем при соединении в треугольник.*

Поясним последнее утверждение. При соединении обмотки статора в звезду напряжение на фазе обмотки в  $\sqrt{3}$  раз меньше линейного напряжения сети. Ток в фазе обмотки пропорционален этому напряжению, а ток в линейных проводах (линейный ток) равен фазному току (пусть его значение составляет 10 А). При соединении обмотки в *треугольник* напряжение на фазе обмотки равно линейному напряжению, и ток в фазе обмотки пропорционален этому напряжению (в нашем примере этот ток равен 17,3 А). Линейный же ток при таком соединении в  $\sqrt{3}$  раз больше фазного (30 А).

Пусковой момент пропорционален квадрату фазного напряжения (см. подразд. 9.5) и при соединении в звезду он в 3 раза меньше, чем при соединении в треугольник.

#### **Включение короткозамкнутого двигателя в сеть через реакторы.**

Это другой способ пуска при пониженном напряжении. *Реакторы* — устройства, обладающие большим индуктивным сопротивлением и применяемые, в частности, для ограничения токов короткого замыкания в электрических сетях, а также в качестве индуктивного балластного сопротивления в схемах тиристорных преобразователей. Схема автоматического пуска с применением реакторов показана на рис. 9.8.

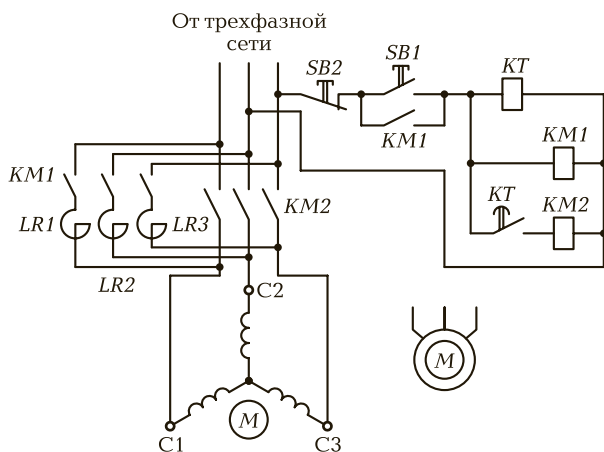


Рис. 9.8. Схема пуска асинхронного двигателя с помощью реакторов

Прямоугольниками на схеме показаны катушки контакторов *КМ* и катушки реле времени *КТ*. Контакты, срабатывающие при протекании токов по катушкам, имеют те же буквенно-цифровые обозначения, что и катушки. *SB1* и *SB2* — замыкающая и размыкающая кнопки. Контакты реле времени *КТ* являются контактами с *замедлением при срабатывании* (на это указывает дуга в обозначении таких контактов). Символом *LR* обозначены реакторы. Буквой *М* обозначен короткозамкнутый асинхронный двигатель, статор которого имеет выводы *С1*, *С2*, *С3*. Внизу справа показан другой способ изображения асинхронного двигателя на электрических схемах.

Рассматриваемая схема действует следующим образом. При нажатии кнопки *SB1* ток от сети течет по катушке реле времени *КТ*, а также по катушке контактора *КМ1*. Якорь (подвижная часть) катушки контактора *КМ1* притягивается к сердечнику катушки, поворачивая ось, на которой укреплены подвижные контакты. Происходит замыкание блок-контактов контактора *КМ1*, шунтирующих кнопку *SB1* (теперь кнопка может быть отпущена), а также силовых контактов контактора *КМ1*, замыкающих цепи реакторов. В результате на обмотку статора двигателя подается напряжение, пониженное по сравнению с напряжением сети из-за наличия в цепи реакторов. Двигатель разгоняется. Через некоторое время, определяемое уставкой реле времени *КТ*, происходит замыкание контактов *КТ*, и по катушке контактора *КМ2* начинает течь ток. При этом замыкаются силовые контакты контактора *КМ2*, шунтирующие реакторы, и двигатель оказывается под полным напряжением сети. При нажатии размыкающей кнопки *SB2* ток перестает течь по катушкам контакторов и контакты размыкаются.

**Включение короткозамкнутого двигателя в сеть через автотрансформатор.** Может осуществляться по схеме, показанной на рис. 9.9. При нажатии кнопки *SB1* ток течет по катушке реле времени *КТ* и по катушке контактора *КМ1*. Силовые контакты контактора *КМ1* включают двигатель через автотрансформатор *Т*. По истечении определенного времени размыкающие контакты реле *КТ* размыкаются, а замыкающие замыкаются. Катушка контактора *КМ1* при этом обесточивается, и автотрансформатор отключается. Одновременно по катушке контактора *КМ2* начинает протекать ток, и силовые контакты контактора *КМ2* включают двигатель на полное напряжение сети.

Размыкающие контакты контактора *КМ2*, соединенные последовательно с катушкой контактора *КМ1*, находятся в замкнутом состоянии, когда по катушке контактора *КМ2* ток *не течет*. Аналогично, размыкающие контакты контактора *КМ1*, соединенные последо-

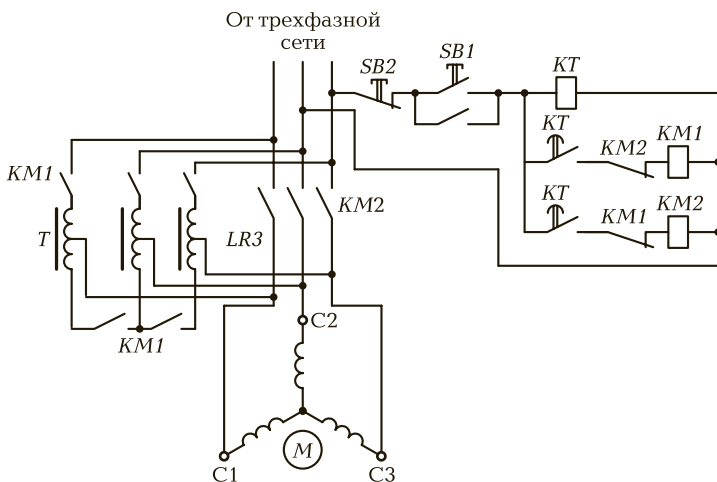


Рис. 9.9. Схема пуска асинхронного двигателя с помощью автотрансформатора

вательно с катушкой контактора  $KM2$ , замкнуты, когда по катушке контактора  $KM1$  ток не течет.

Применяется также двухступенчатый автотрансформаторный пуск, когда после первоначального разгона размыкаются контакты, соединяющие обмотку автотрансформатора в звезду (в этом случае верхние и нижние контакты в цепи автотрансформатора принадлежат разным контакторам). При размыкании нижних контактов автотрансформатор превращается в реактор; напряжение питания обмотки статора повышается, но остается ниже номинального. На второй ступени пуска двигатель включается на полное напряжение сети.

**Короткозамкнутые двигатели с улучшенными пусковыми свойствами.** Для увеличения пускового момента асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором применяют двойную обмотку ротора (двойную «белчью клетку»), а также ротор с глубокими пазами.

Двойная обмотка короткозамкнутого ротора состоит из внутренней 2 и наружной 1 обмоток (рис. 9.10, а). В момент включения двигателя в сеть ротор неподвижен, и частота тока ротора равна частоте тока сети:  $f_2 = f_1$ . Ток в обмотках распределяется обратно пропорционально их полным сопротивлениям. Внутренняя обмотка глубоко погружена в тело ротора и сцеплена с большим числом силовых линий магнитного потока пазового рассеяния, чем

наружная обмотка. Тогда, при значительной частоте тока, индуктивное сопротивление внутренней обмотки оказывается большим, за счет чего ее полное сопротивление значительно превышает полное сопротивление наружной обмотки. Поэтому *ток при пуске протекает в основном во внешней обмотке*. Ввиду того что сечение стержней внешней обмотки выполняется значительно меньшим сечения внутренних стержней, активное сопротивление первых значительно превышает активное сопротивление вторых. Кроме того, стержни верхней обмотки часто выполняют из латуни или бронзы — материалов, обладающих более высоким удельным сопротивлением, чем медь и алюминий.

Итак, с одной стороны, из-за высокого полного сопротивления внутренних стержней ток во время пуска протекает преимущественно по внешним стержням. С другой стороны, внешние стержни имеют большое активное сопротивление, и по этой причине максимальный момент двигателя смещается в область больших скольжений; при этом *пусковой момент значительно увеличивается по сравнению с двигателем обычного исполнения* (см. рис. 9.6, на котором штриховой линией показана механическая характеристика двигателя при повышенном сопротивлении цепи ротора). Внешнюю обмотку называют *п у с к о в о й*.

В рабочем режиме скольжение мало, и частота тока в роторе близка к нулю ( $f_2 = sf_1 \approx 0$ , см. формулу (9.7)). Поэтому индуктивные сопротивления обеих обмоток ротора становятся весьма малыми, и ток между обмотками распределяется обратно пропорционально их активным сопротивлениям. Таким образом, *после пуска ток течет в основном по внутренней обмотке ротора*, называемой *р а б о ч е й*.

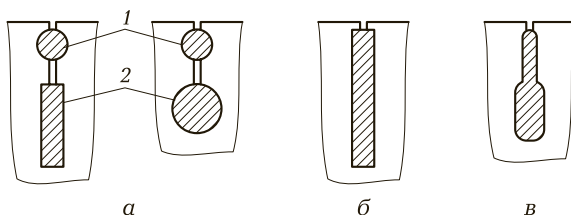
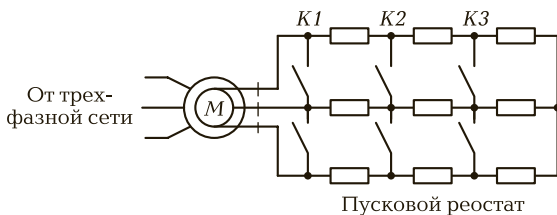


Рис. 9.10. Стержни короткозамкнутых роторов с улучшенными пусковыми свойствами:

а — стержни двойной обмотки: 1 — стержни внешней (пусковой) обмотки; 2 — стержни внутренней (рабочей) обмотки; б — стержень ротора с глубокими пазами; в — стержень бутылочной формы



Рис. 9.11. Двигатель с пусковым реостатом



Аналогично объясняется принцип действия ротора с глубокими пазами (рис. 9.10, б). Во время пуска ток оттесняется к наружной части стержня, поскольку нижняя часть обладает большим индуктивным сопротивлением, а во время работы все сечение стержня используется практически равномерно.

Применение стержней бутылочной формы (рис. 9.10, в) позволяет уменьшить высоту пазов по сравнению с глубокопазным ротором, и за счет этого уменьшить диаметр ротора.

**Пуск асинхронных двигателей с фазным ротором.** Для увеличения активного сопротивления цепи фазного ротора к обмотке ротора через контакты кольца — щетки подключают пусковой реостат (рис. 9.11). В момент пуска контакты контакторов  $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$  разомкнуты, что обеспечивает наибольшее сопротивление цепи ротора и наибольший пусковой момент (см. рис. 9.6). По мере разгона двигателя поочередно замыкаются контакты контакторов  $K3$ ,  $K2$  и  $K1$  (цепь автоматического управления на рис. 9.11 не показана). После замыкания контактов контактора  $K1$  все ступени пускового реостата оказываются зашунтированными, и обмотка ротора замкнута накоротко; двигатель разгоняется до номинальной частоты вращения, и на этом процесс пуска заканчивается. Двигатели с фазным ротором обладают наилучшими пусковыми свойствами, поскольку возможность включения пускового реостата эффективно решает две задачи: уменьшение пускового тока и повышение пускового момента. Пусковые реостаты рассчитывают лишь на кратковременную работу во время пуска.

## 9.8. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Частота вращения  $n_1$  ротора асинхронного двигателя согласно формуле (9.32) зависит от числа пар полюсов обмотки статора  $p$ ,

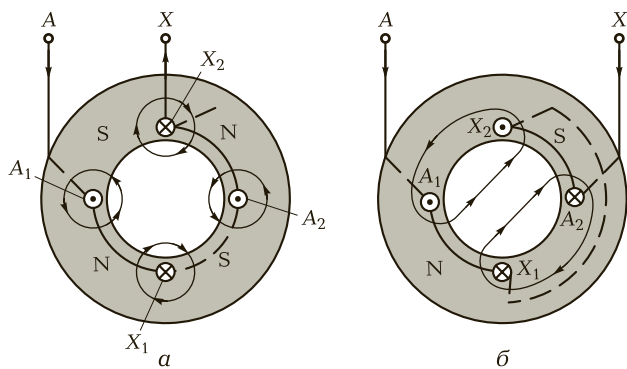


Рис. 9.12 Схемы включения одной фазы обмотки статора на различное число полюсов:

*а* — четыре полюса ( $p = 2$ ); *б* — два полюса ( $p = 1$ )

скольжения ротора  $s$  и частоты  $f_1$  трехфазного напряжения, питающего двигатель. Воздействуя на какой-либо из перечисленных параметров, можно регулировать частоту вращения.

**Регулирование частоты вращения изменением числа пар полюсов.** Осуществляется выполнением на статоре нескольких (обычно двух) обмоток, создающих магнитное поле с различным числом полюсов, либо выполнением одной обмотки, допускающей переключение на различное число полюсов. Могут быть также выполнены две обмотки, каждая из которых допускает переключение на различное число полюсов.

На рис. 9.12 *а, б* показан пример одной фазы обмотки статора, которая может переключаться на две и на одну пару полюсов. (Наличие трех фаз обмотки не приводит к увеличению числа полюсов, а обеспечивает вращение поля.) Штриховыми линиями показаны лобовые соединения, проходящие по заднему торцу статора. Тонкими замкнутыми линиями со стрелками изображены силовые линии магнитного поля. Направление силовых линий определено по правилу буравчика в соответствии с направлениями токов в активных проводниках обмотки статора (направления токов указаны точками и крестиками).

Пример соединения обмоток четырехскоростного двигателя дан на рис. 9.13. На статоре размещены две трехфазные обмотки. Фазы каждой обмотки соединены между собой треугольником. Каждая фаза разделена на две катушки. Соединение, выполненное по схеме, приведенной на рис. 9.13, *а*, в котором задействована только одна

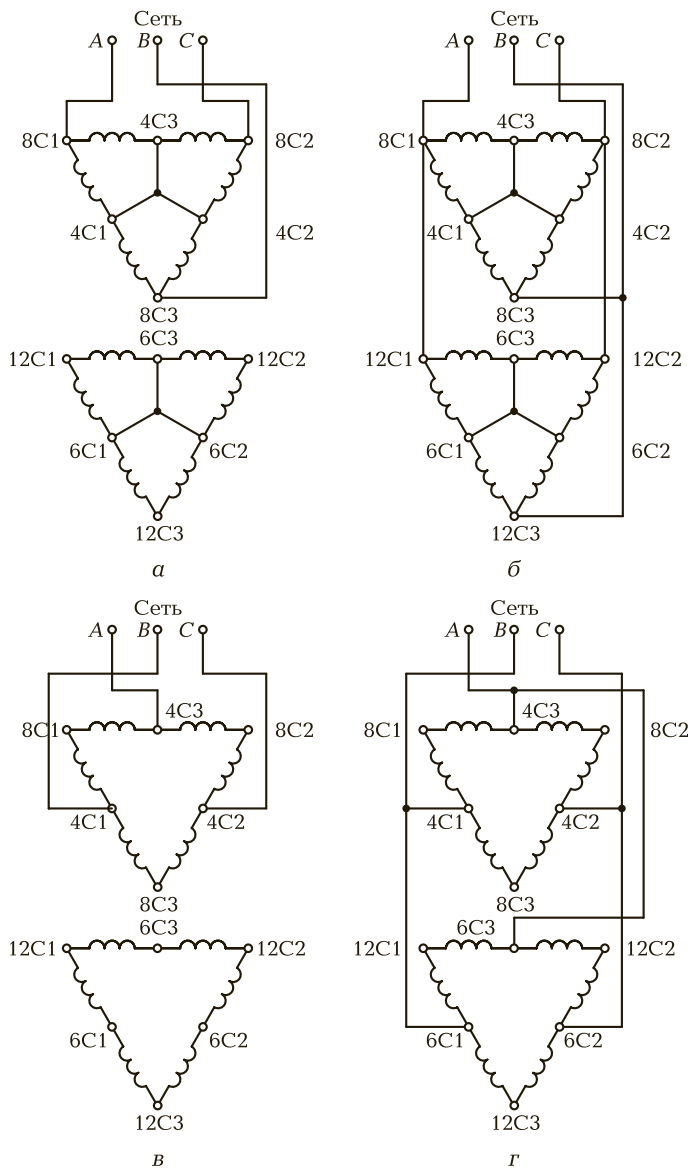


Рис. 9.13. Схемы соединения обмоток четырехскоростного двигателя:  
*а* – 8 полюсов ( $p = 4$ ); *б* – 12 полюсов ( $p = 6$ ); *в* – 4 полюса ( $p = 2$ ); *г* – 6 полюсов ( $p = 3$ )

обмотка, обеспечивает четыре пары полюсов. При частоте напряжения питания 50 Гц согласно формуле (8.4) частота вращения поля статора в этом случае составляет 750 об/мин. Номинальная частота вращения ротора согласно техническому паспорту двигателя составляет при этом 705 об/мин. Соединение, выполненное в соответствии с рис. 9.13, б, дает шесть пар полюсов. При этом  $n_1 = 500$  об/мин;  $n_{2\text{ном}} = 460$  об/мин. Рис. 9.13, в и г указывают соединения, при которых обеспечиваются числа пар полюсов два и три, соответственно; скорости вращения поля ротора 1 500 и 1 000 об/мин; номинальные скорости вращения ротора 1 410 и 910 об/мин.

Описанный способ регулирования частоты вращения является экономичным, но имеет тот недостаток, что регулирование получается ступенчатым. Кроме того, этот способ применим *только для двигателей с короткозамкнутым ротором*. В двигателях с фазным ротором при изменении числа полюсов статора необходимо было бы переключать и обмотку ротора на то же самое число полюсов, что очень сложно в конструктивном отношении и значительно повышает стоимость и габариты многоскоростных двигателей.

**Способы регулирования частоты вращения изменением скольжения.** Реализуются путем изменения активного сопротивления цепи ротора, изменения напряжения питания статора, изменения симметрии питающего трехфазного напряжения.

Изменение активного сопротивления цепи ротора применяется в двигателях с фазным ротором. С этой целью к обмотке ротора через щеточные контакты присоединяется регулировочный реостат, который, в отличие от пускового реостата (см. рис. 9.11), рассчитан на длительный режим работы. Из рис. 9.6, на котором отражено изменение механической характеристики двигателя при изменении активного сопротивления цепи ротора, следует, что при данном (например, номинальном) вращающем моменте скольжение будет тем больше (и частота вращения тем меньше), чем больше активное сопротивление. Таким образом, при изменении сопротивления регулировочного реостата происходит изменение скорости вращения двигателя. Данный способ регулирования частоты вращения находит широкое применение, хотя он и не экономичен, поскольку в регулировочном реостате происходит значительная потеря энергии.

**Примечание.** Сравнивая положения точек, соответствующих одному и тому же значению вращающего момента на двух характеристиках, мы предполагаем, что с изменением частоты вращения двигателя не изменяется статический на-

грузочный момент (см. уравнение (3.15)). Такое предположение сделано для простоты анализа, но в ряде случаев неизменность статического момента действительно имеет место (см. подразд. 3.3)

Регулирование частоты вращения изменением напряжения питания — более экономичный способ, но позволяет изменять частоту в малых пределах (10... 15%). На рис. 9.14 показаны две механические характеристики асинхронного двигателя, полученные при различных напряжениях питания обмотки статора. Как видно из рисунка, одному и тому же вращающему моменту соответствуют разные скольжения при различных напряжениях питания. Данный способ регулирования осуществляется только при понижении напряжения относительно номинального значения, поскольку превышать номинальное значение не допускается.

Напряжение питания можно изменять посредством *регулируемого автотрансформатора*, включенного в цепь статора по схеме, аналогичной схеме пуска (см. рис. 9.9), но без применения автоматики отключения автотрансформатора.

Для регулирования напряжения применяется также трехфазный *дроссель насыщения*, рабочие обмотки которого включены в цепь статора, а обмотки управления, не связанные электрически с рабочими обмотками, питаются от регулируемого источника постоянного напряжения. С увеличением тока обмоток управления усиливается магнитное насыщение сердечников дросселя, и его индуктивное сопротивление уменьшается, за счет чего увеличивается напряжение питания двигателя.

Более совершенная аппаратура регулирования напряжения, обладающая к тому же существенно меньшими габаритными размерами и массой, выполняется на основе *тиристорных регуляторов*.

Регулирование частоты вращения нарушением симметрии напряжения питания также относится к способам регулирования, приводящим к изменению скольжения.

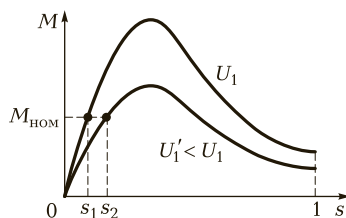


Рис. 9.14. Механические характеристики при различных значениях напряжения питания

Симметричная трехфазная система токов, текущих по симметрично расположенным фазам обмотки статора, создает вращающееся магнитное поле, вектор индукции которого не изменяется по модулю (см. подразд. 8.1). Такое магнитное поле называется *круговым*. Если же система токов несимметрична, т. е. если обмотку статора питает несимметричное трехфазное напряжение, то вектор  $\mathbf{B}$  в процессе вращения изменяется по модулю и поле становится *эллиптическим*.

Математически доказывается, что эллиптическое поле может быть представлено состоящим из двух неравных круговых составляющих: *прямому полю* соответствует вращение вектора  $\mathbf{B}_{\text{пр}}$  в прямом направлении, а *обратному полю* соответствует вращение вектора  $\mathbf{B}_{\text{обр}}$ , меньшего по модулю, в обратном направлении. Результирующий электромагнитный момент ( $M = M_{\text{пр}} - M_{\text{обр}}$ ) меньше электромагнитного момента, действующего в машине при ненарушенной симметрии трехфазного напряжения. Тогда электромагнитный момент, необходимый для преодоления одного и того же статического момента, будет достигаться в случаях кругового и эллиптического поля при разных скольжениях, подобно тому, что имеет место при различных напряжениях питания (см. рис. 9.14).

Нарушение симметрии трехфазного напряжения питания и регулирование степени этого нарушения могут быть обеспечены включением в цепь одной из фаз обмотки статора однофазного регулировочного автотрансформатора. Область регулирования частоты вращения получается довольно узкой, а КПД двигателя при увеличении несимметрии напряжения снижается. Данный способ регулирования применяется преимущественно в двигателях малой мощности.

Импульсное регулирование частоты вращения является одним из способов изменения среднего напряжения питания. Для двигателей постоянного тока этот способ описан в подразд. 3.6. Среднее напряжение изменяется за счет периодического отключения и подключения обмотки статора к сети посредством контактора, управляемого импульсами постоянного напряжения, или посредством бесконтактного устройства, например тиристорного ключа. В условиях периодического прерывания питания двигатель постоянно работает в режиме ускорения и замедления. Средняя частота вращения определяется средним напряжением питания, которое зависит от соотношения промежутков времени включенного и отключенного состояний.

**Регулирование частоты вращения изменением частоты питающего напряжения.** Основано на изменении частоты вращения поля

статора (см. выражение (8.4)) и реализуется при использовании источников питания с регулируемой частотой. Таковыми могут служить электромашинные или полупроводниковые преобразователи частоты. При изменении частоты питающего напряжения изменяются и максимальный момент двигателя, и вместе с ним перегрузочная способность  $M_{\max}/M_{\text{ном}}$ . Чтобы работа двигателя была устойчивой, т. е. чтобы случайные перегрузки не приводили к остановке двигателя, перегрузочную способность необходимо сохранять в процессе регулировки. Поэтому одновременно с изменением частоты напряжения питания требуется изменять значение напряжения. Характер одновременного изменения частоты и напряжения зависит от свойств электропривода, т. е. от того, как изменяется нагрузочный статический момент при изменении частоты вращения. В частности, при неизменности статического момента *напряжение должно изменяться пропорционально частоте*.

## 9.9. ГЕНЕРАТОРНЫЙ РЕЖИМ И СПОСОБЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Асинхронная машина в режиме генератора. Рекуперативное торможение.** Согласно свойству обратимости электрических машин каждая машина может работать как в двигательном, так и в генераторном режиме (см. подразд. 3.1).

Пусть обмотка статора асинхронной машины подключена к трехфазной сети, а ее вал соединен с валом первичного двигателя (паровой турбины, синхронного двигателя и т. д.). Если первичный двигатель раскрутит вал до частоты  $n_2$ , превышающей частоту вращения  $n_1$  магнитного поля асинхронной машины, то ее скольжение станет отрицательным (см. выражения (9.2) и (9.30)). Отрицательным при этом станет также и активная составляющая тока ротора  $I'_s \cos \psi_2$ , определяющая электромагнитный момент  $M$  (см. выражение (9.29)). Действительно, знак тока ротора согласно уравнению (9.10) зависит от знака скольжения, а величина  $\cos \psi_2$  всегда положительна (см. уравнение (9.31)).

Итак, при условии  $n_2 > n_1$  электромагнитный момент  $M$  выражается отрицательным числом (является тормозным). Это означает, что машина не вырабатывает механическую мощность (не является двигателем), а потребляет ее, т. е. работает генератором, преобразующим механическую мощность в электрическую, которую он

отдает в трехфазную сеть. Особенностью асинхронного генератора является необходимость его подключения к трехфазной сети, благодаря которой происходит возбуждение генератора, т. е. создание вращающегося магнитного поля.

Механическая характеристика асинхронной машины в режиме генератора показана на рис. 9.6, слева. Скольжение ротора в этом режиме может изменяться, теоретически, в пределах  $(0, -\infty)$ .

Для создания магнитного поля из сети потребляется реактивная мощность. Эта мощность велика: она составляет от 20 до 50 % полной мощности асинхронного генератора. По этой причине асинхронные генераторы не нашли применение в качестве источников электроэнергии. Эта роль принадлежит синхронным генераторам, рассматриваемым в гл. 11.

Генераторный режим работы асинхронной машины используется для *рекуперативного торможения*, например, при спуске груза подъемным краном. Под действием силы тяжести груза ротор приводного асинхронного двигателя разгоняется, и его частота вращения становится больше частоты вращения поля. Возникающий при этом тормозной момент ограничивает скорость спуска груза, а кинетическая энергия груза преобразуется в электрическую энергию и возвращается в сеть.

В подразд. 3.8 было рассмотрено рекуперативное торможение на примере двигателя постоянного тока. Прочие виды электрического торможения двигателя постоянного тока (см. подразд. 3.8) применяются также и для асинхронных двигателей.

**Динамическое торможение асинхронного двигателя.** Если в двигателе постоянного тока динамическое торможение осуществляется переключением якоря с источника на реостат, то в асинхронном двигателе аналогичный эффект достигается при отключении обмотки статора от сети переменного напряжения и подключении его к источнику постоянного напряжения, для чего используется переключатель. Один из выводов статора подключают при этом к положительному зажиму источника, два других соединяют между собой и подключают к отрицательному зажиму источника. В обмотке статора будет протекать постоянный ток, возбуждающий постоянное по величине и неподвижное магнитное поле. В обмотке ротора, который продолжает вращаться по инерции, наводится при этом ЭДС, создающая ток ротора. При взаимодействии магнитного поля этого тока с неподвижным полем статора возникает тормозной момент. В самом деле, если при вращении поля статора возникают причины, вызывающие вращение ротора (см. подразд. 9.1), то в случае покоящегося поля те же причины стремятся заставить остановиться вра-



щающийся ротор. Как при пуске неподвижного двигателя, так и при динамическом торможении вращающегося ротора имеет место *вращение поля статора относительно ротора*.

ЭДС, индуцированная в обмотке ротора, уменьшается по мере уменьшения частоты вращения, поэтому и тормозной момент уменьшается.

Для регулирования тормозного момента в двигателе с фазным ротором изменяют сопротивление резисторов в цепи ротора, а в двигателе с короткозамкнутым ротором изменяют сопротивление резистора, включенного в цепь постоянного тока.

Для асинхронных двигателей применяют также *конденсаторное торможение*, являющееся разновидностью динамического торможения и основанное на явлении *самовозбуждения* машины. Для возникновения самовозбуждения используется *остаточный магнитный поток* сердечника ротора. Если вращающийся двигатель отключить от сети, то ЭДС обмотки статора не станет равной нулю, поскольку остаточный поток ротора будет индуцировать в каждой фазе статора остаточную ЭДС, отстающую от потока по фазе на  $\pi/2$ . Если одновременно с отключением от сети обмотку статора присоединить к батарее конденсаторов, то под действием остаточной ЭДС в обмотке будет протекать ток, опережающий ЭДС по фазе на  $\pi/2$ , как это имеет место при емкостной нагрузке. В результате магнитный поток, создаваемый этим током, будет совпадать по фазе с остаточным магнитным потоком, вследствие чего общий магнитный поток увеличится. Увеличение потока приводит к увеличению ЭДС статора, и далее процесс развивается до того момента, когда ЭДС становится уравновешенной падением напряжения в емкостном сопротивлении (сравните с самовозбуждением генераторов постоянного тока, описанным в подразд. 2.4)

При взаимодействии поля статора, обусловленного самовозбуждением, с полем ротора, обусловленным наличием в его обмотке тока, возникает тормозной момент. По мере торможения оба поля ослабляются, а вместе с ними уменьшается и тормозной момент.

**Торможение противовключением.** Осуществляется изменением направления вращения поля статора. Для этого два из трех проводов, соединяющих обмотку статора с трехфазной сетью, меняют местами посредством переключателя. Те же причины, которые обуславливают разгон асинхронного двигателя, теперь вызывают его торможение: ротор стремится следовать за вращающимся полем статора.

В процессе торможения противовключением направления вращения ротора и поля статора противоположны, и скольжение превышает единицу (см. выражение (9.2) и рис. 9.6). Ток ротора

при этом превышает пусковой ток (см. уравнение (9.11), учитывая, что при пуске  $s = 1$ ). Поэтому на время торможения противовключением в цепь ротора необходимо ввести активное сопротивление. Таким образом, данный, весьма эффективный, способ торможения может быть использован только в двигателях с фазным ротором.

После уменьшения частоты вращения до нуля двигатель необходимо отключить от сети, иначе начнется его разгон в противоположную сторону (реверс).

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Опишите явления, лежащие в основе принципа работы трехфазного асинхронного двигателя.
2. Что называется скольжением ротора асинхронной машины?
3. Опишите конструкции короткозамкнутого и фазного роторов асинхронной машины. Каково назначение контактных колец фазного ротора?
4. Почему в технической документации асинхронного двигателя указываются два значения номинального напряжения? От чего зависит выбор способа соединения фаз обмотки статора?
5. Запишите уравнения напряжений обмоток статора и ротора асинхронного двигателя. Проведите сравнительный анализ этих уравнений и уравнений напряжений обмоток трансформатора.
6. От чего зависит частота тока ротора и как она влияет на значение тока ротора?
7. Что понимают под заменой вращающегося ротора эквивалентным неподвижным? Запишите уравнение тока ротора с учетом такой замены.
8. Чем отличаются коэффициенты трансформации ЭДС и тока асинхронного двигателя от коэффициента трансформации трансформатора?
9. С какой целью выполняется приведение величин обмотки ротора к числу витков и числу фаз обмотки статора? Каковы условия приведения?
10. Что общего в векторных диаграммах асинхронного двигателя и трансформатора? Каковы различия между этими диаграммами?
11. Начертите схему замещения асинхронного двигателя и сравните ее со схемой замещения трансформатора.
12. Какие мощности потерь имеются в асинхронном двигателе? Что характеризует электромагнитная мощность двигателя?
13. Какие значения скольжения соответствуют работе асинхронной машины в режиме двигателя; режиме генератора; режиме торможения противовключением?

14. Каковы особенности зависимости электромагнитного момента асинхронного двигателя от активного сопротивления цепи ротора?
15. Опишите и объясните вид рабочих характеристик асинхронного двигателя.
16. Какие существуют способы пуска асинхронных двигателей? Какие способы применяются для двигателей с короткозамкнутым ротором и какие — для двигателей с фазным ротором? Назовите преимущества и недостатки каждого способа пуска.
17. Каковы особенности конструкции короткозамкнутых роторов с улучшенными пусковыми свойствами? В чем состоит улучшение пусковых свойств таких роторов по сравнению с обычной «беличьей клеткой» и какова причина улучшения?
18. Назовите способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей. Какие способы применяются для двигателей с короткозамкнутым ротором и какие — для двигателей с фазным ротором?
19. Опишите способы электрического торможения асинхронных двигателей. Назовите преимущества и недостатки каждого способа.

# СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТИПЫ АСИНХРОННЫХ МАШИН

## 10.1. ИНДУКЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР И ФАЗОРЕГУЛЯТОР

**Индукционный регулятор.** Он называется также потенциал-регулятором и поворотным автотрансформатором — это *асинхронная машина с заторможенным ротором*, предназначенная для регулирования напряжения в широких пределах. На роторе регулятора помещается фазная обмотка. Напряжение регулируют путем поворота ротора. При повороте ротора изменяется сдвиг фаз между электродвижущими силами, созданными вращающимся магнитным полем в фазах обмоток статора и ротора. Для поворота ротора и удержания его в заторможенном состоянии служит *червячная передача с самоторможением* (в такой передаче тангенс угла наклона винтовой поверхности червяка меньше коэффициента трения).

Схема трехфазного индукционного регулятора показана на рис. 10.1, а. Начала фаз обмотки статора ( $A, B, C$ ) подключены к трехфазной сети с линейным напряжением  $U_1$ . К той же сети через скользящие контакты щеток и колец подключены начала фаз обмотки ротора ( $a, b, c$ ). (Скользящие контакты отмечены на схеме поперечными черточками.) Концы обмотки ротора ( $x, y, z$ ) замкнуты между собой. Таким образом, обмотка ротора соединена звездой, и напряжения на фазах обмотки ротора всегда равно фазному напряжению сети независимо от положения ротора в пространстве. Концы фаз обмотки статора ( $X, Y, Z$ ) соединены с сетью приемника энергии, напряжение которой  $U_2$  регулируется путем вращения ротора индукционного регулятора. Описанная схема соединения обмоток индукционного регулятора называется *автотрансформаторной*.

Действие регулятора поясняет векторная диаграмма (рис. 10.1, б), построенная для одной фазы регулятора. Когда регулятор включен в трехфазную сеть, по обмотке неподвижного ротора протекает трехфазная система токов, создающая вращающееся магнитное

поле. Это поле индуцирует ЭДС  $E_{1\phi}$  в фазах обмотки ротора и ЭДС  $E_{2\phi}$  в фазах обмотки статора. Пусть регулятор работает в режиме холостого хода (к зажимам статора X, Y, Z нагрузка не подключена), и ток в обмотке статора отсутствует. Если пренебречь падением напряжения в сопротивлениях обмотки ротора, то можно записать:  $\underline{U}_{1\phi} = -\underline{E}_{1\phi}$  или для линейного напряжения и линейной ЭДС,  $\underline{U}_1 = -\underline{E}_1$  (см. выражение (5.1)), т. е. вектор  $\underline{E}_1$  равен по величине и противоположен по направлению вектору  $\underline{U}_1$  при любом положении ротора в пространстве.

**Примечание.** Все рассуждения будут проводиться для фазных напряжений и ЭДС, но в дальнейшем в обозначениях величин индекс «ф» использоваться не будет, поскольку для *линейных* величин справедливы такие же соотношения, а выходной величиной является линейное напряжение  $\underline{U}_2$ .

Для удобства построения векторной диаграммы будем считать, что ЭДС фазы ротора больше ЭДС фазы статора:  $E_1 > E_2$ . Если ротор занимает такое положение, при котором оси магнитных полей ротора и статора совпадают, то ЭДС, индуцируемые вращающимся магнитным полем в обмотках статора и ротора, совпадают по фазе, т. е. в этом случае на векторной диаграмме вектор  $\underline{E}_2$  совпадает по направлению с вектором  $\underline{E}_1$ .

Если повернуть ротор *по направлению вращения магнитного поля* на угол  $\beta$ , то силовые линии вращающегося поля будут пересекать

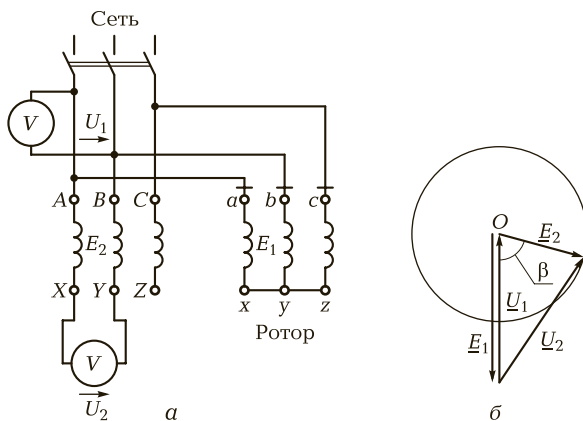


Рис. 10.1. Трехфазный индукционный регулятор:

а — схема; б — векторная диаграмма

витки катушек статора раньше, чем витки катушек ротора. В этом случае ЭДС статора опережает по фазе ЭДС ротора, т. е. вектор ЭДС статора  $\underline{E}_2$ , неизменный по величине, окажется повернутым на угол  $\beta$  относительно вектора  $\underline{E}_1$  в сторону опережения (этот случай показан на рис. 10.1, б).

При повороте ротора *против поля* на угол  $\beta$  ЭДС статора будет отставать по фазе от ЭДС ротора, и на диаграмме вектор  $\underline{E}_2$  будет повернут на угол  $\beta$  в сторону отставания относительно вектора  $\underline{E}_1$ .

Изменяя угол поворота ротора, мы будем изменять угол между векторами ЭДС статора и ротора, и вектор ЭДС статора  $\underline{E}_2$  будет изменять свое положение так, что конец этого вектора опишет окружность радиуса  $E_2$  с центром в точке  $O$ , которая является началом вектора  $\underline{E}_1$  и концом вектора  $\underline{U}_1$ .

Напряжение  $\underline{U}_2$  сети приемника электрической энергии определяется как сумма векторов  $\underline{U}_1$  и  $\underline{E}_2$ :

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 + \underline{E}_2. \quad (10.1)$$

Для сравнения вспомним, что в *трансформаторе* при холостом ходе  $\underline{U}_2 = \underline{E}_2$  (см. выражение (5.2)). Вектор  $\underline{U}_2$  на рис. 10.1, б построен в соответствии с равенством (10.1).

Численное значение напряжения  $U_2$  может быть вычислено из теоремы косинусов, записанного для треугольника со сторонами  $U_2$ ,  $U_1$  и  $E_2$ :

$$U_2 = \sqrt{U_1^2 + E_2^2 - U_1 E_2 \cos \beta}. \quad (10.2)$$

Отметим, что в случае если машина имеет число пар полюсов  $p$ , большее единицы, то угол  $\beta$  измеряется в электрических градусах, причем

$$\beta \text{ (эл. град.)} = p\beta^\circ, \quad (10.3)$$

что следует из рассуждений, приведенных в подразд. 8.2).

В частности, если число пар полюсов равно двум, то угол между следующими друг за другом *одноименными* полюсами равен  $180^\circ$ , или  $360$  эл. град.

При изменении угла поворота ротора от  $0$  до  $180$  эл. град. может быть получено любое напряжение на выходных зажимах регулятора в пределах от  $U_{2\min} = U_1 - E_2$  до  $U_{2\max} = U_1 + E_2$ .

Если регулятор имеет коэффициент трансформации  $k = 1$ , т. е. если  $E_2 = E_1 = U_1$ , то  $U_{2\min} = 0$  и  $U_{2\max} = 2U_1$ .

**Фазорегулятор (поворотный трансформатор).** Предназначен для изменения сдвига фаз между напряжениями на зажимах источника и нагрузки в пределах от  $0$  до  $360^\circ$ . Фазорегулятор отличается от индукционного регулятора лишь схемой включения: обмотку его стато-

ра подключают к трехфазной сети, а обмотку ротора к трем фазам нагрузки. Таким образом, в отличие от индукционного регулятора, используется не автотрансформаторная, а трансформаторная схема включения. В этом случае при повороте ротора с помощью червячной передачи изменяется фаза между входным и выходным напряжениями, но значение выходного напряжения не изменяется.

Фазорегуляторы применяются для фазового управления в устройствах автоматики.

## 10.2. ОДНОФАЗНЫЙ И КОНДЕНСАТОРНЫЙ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

**Принцип работы однофазного асинхронного двигателя.** Если статор короткозамкнутого асинхронного двигателя снабдить однофазной обмоткой и подключить ее к источнику однофазного синусоидального напряжения, то она создаст невращающийся пульсирующий магнитный поток, изменяющийся по синусоидальному закону. Такой поток каждую половину периода изменяет свое направление на  $180^\circ$ .

Для анализа процессов в однофазном двигателе удобно представить пульсирующий магнитный поток как результат наложения двух потоков одинаковой величины, вращающихся в противоположных направлениях. Такое представление основано на следующем соображении: если два вектора с модулем  $B$  вращаются с одинаковой частотой в противоположных направлениях, то вектор, являющийся их суммой, будет изменяться по синусоидальному закону; его модуль будет пробегать значения от 0 до  $2B$ , и через каждую половину периода вращения составляющих векторов он будет изменять свое направление на противоположное.

Таким образом, магнитный поток  $\Phi$ , созданный в однофазной обмотке, может быть разложен на два одинаковых по величине вращающихся потока: прямой поток  $\Phi_{пр}$  и обратный  $\Phi_{обр}$ , причем без задания дополнительных условий эти потоки равноправны, и прямое направление выбирается произвольно.

Вращающие моменты, действующие на ротор двигателя со стороны двух вращающихся в противоположных направлениях магнитных потоков, компенсируют друг друга, так что пусковой момент равен нулю.

Приложим к ротору двигателя, подключенного к однофазной сети, *внешний вращающий момент* со стороны какого-либо механизма,

заставив ротор вращаться с частотой  $n_2$ , меньшей частоты вращения прямого и обратного потоков статора. Заданное направление вращения будем рассматривать как прямое. Прямой поток статора  $\Phi_{\text{пр}}$  при этом будет иметь относительно ротора частоту вращения

$$n_{\text{пр}} = n_1 - n_2.$$

Выразим частоту  $n_2$  через частоту  $n_1$  и скольжение  $s$  согласно равенству (9.2):  $n_2 = n_1(1 - s)$ . Тогда

$$n_{\text{пр}} = n_1 - n_1(1 - s) = n_1 s.$$

Обратный поток  $\Phi_{\text{обр}}$  будет вращаться относительно ротора с частотой

$$n_{\text{обр}} = n_1 + n_2 = n_1 + n_1(1 - s) = n_1(2 - s).$$

Скольжение  $s$  меньше единицы, а разность  $(2 - s)$  больше единицы. В таком случае ЭДС  $E_{2\text{пр}}$  и ток  $I_{2\text{пр}}$ , созданные прямым потоком в роторе, имеют меньшую частоту, чем частота напряжения сети:

$$f_{2\text{пр}} = s f_1. \quad (10.4)$$

ЭДС  $E_{2\text{обр}}$  и ток  $I_{2\text{обр}}$ , созданные обратным потоком, имеют, напротив, большую частоту, чем частота напряжения сети:

$$f_{2\text{обр}} = (2 - s) f_1. \quad (10.5)$$

В результате взаимодействия прямого и обратного потоков с токами в обмотках ротора создаются противоположно направленные вращающие моменты:

$$M_{\text{пр}} = C \Phi_{\text{пр}} I'_{2\text{пр}} \cos \psi_{2\text{пр}}; \quad M_{\text{обр}} = C \Phi_{\text{обр}} I'_{2\text{обр}} \cos \psi_{2\text{обр}}$$

(см. уравнение (9.29)).

Как было изложено ранее, прямой и обратный потоки равны между собой. Значения прямого и обратного вращающих моментов зависят от активных составляющих токов ротора, т. е. от значений выражений  $I'_{2\text{пр}} \cos \psi_{2\text{пр}}$  и  $I'_{2\text{обр}} \cos \psi_{2\text{обр}}$ .

При малом скольжении частота *обратного тока* близка к двойной частоте напряжения питания (значение  $f_{2\text{обр}}$  в соответствии с выражением (10.5) мало отличается от  $2f_1$ ). При такой частоте обмотка имеет индуктивное сопротивление, значительно превышающее активное, поэтому фазовый угол  $\psi_{2\text{обр}}$  близок к  $\pi/2$ , и активная составляющая обратного тока  $I'_{2\text{обр}} \cos \psi_{2\text{обр}}$  незначительна.

Частота *прямого тока*, определяемая выражением (10.4) мала; угол  $\psi_{2\text{пр}}$  близок к нулю, и  $\cos \psi_{2\text{пр}}$  мало отличается от единицы. Таким образом, активная составляющая прямого тока заметно превышает активную составляющую обратного тока. По этой причине прямой вращающий момент  $M_{\text{пр}}$  превышает обратный момент  $M_{\text{обр}}$ . Тогда



результатирующий момент  $M = M_{\text{пр}} - M_{\text{обр}}$  положителен, т. е. *направлен в сторону прямого момента.*

*Мы пришли к заключению: если валу асинхронного двигателя, имеющего однофазную обмотку, сообщить вращение в каком-либо направлении, то появится неравный нулю электромагнитный момент, имеющий такое же направление, и внешнее воздействие перестанет быть необходимым.*

Согласно принципу разложения пульсирующего магнитного потока на два вращающихся потока, асинхронный двигатель с однофазной обмоткой эквивалентен двум одинаковым трехфазным двигателям, имеющим один вал и создающим противоположно направленные электромагнитные моменты. При равенстве этих моментов пусковой момент равен нулю. Если за счет постороннего воздействия вал приведен во вращение в каком-либо направлении с частотой, меньшей синхронной частоты, то вращающийся момент одного из рассматриваемых двигателей будет совпадать с направлением внешнего воздействия. Скольжение этого двигателя  $s_{\text{пр}} = s$  будет находиться в интервале от 0 до 1. Второй двигатель будет при этом иметь вращающийся момент, направленный против внешнего воздействия, и его скольжение окажется в интервале от 1 до 2 ( $s_{\text{обр}} = 2 - s$ ). Вращающиеся моменты, соответствующие разным скольжениям, могут быть определены по механической характеристике двигателя (см. на рис. 9.6 кривую, построенную для сопротивления цепи ротора  $R_{21}$ ). Из характеристики видно, что при скольжениях, меньших единицы, вращающийся момент больше, чем при скольжениях, превышающих единицу (последний случай соответствует режиму торможения противовключением). Тогда суммарный вращающийся момент двух двигателей с общим валом будет направлен в сторону внешнего воздействия. Если на валу отсутствует механическая нагрузка, то достаточно лишь небольшого толчка в некотором направлении, чтобы система двух двигателей начала самостоятельное вращение в том же направлении.

Таким образом, вывод, сделанный ранее на основе разложения пульсирующего магнитного поля на два вращающихся, подтвержден на модели двух трехфазных двигателей.

**Пуск однофазного асинхронного двигателя. Конденсаторный двигатель.** Для приведения во вращение однофазного асинхронного двигателя электрическим способом (без внешнего механического воздействия) необходимо на время пуска создать вращающееся магнитное поле. Для этого требуется:

- на статоре поместить две обмотки, сдвинутые в пространстве одна относительно другой на угол 90 эл. град.;

- обеспечить ненулевой сдвиг фаз между токами этих обмоток. Чаще всего это делают включением в цепь одной из обмоток пускового конденсатора  $C_{п}$  (рис. 10.2, а).

Наибольший пусковой момент (до  $2M_{ном}$ ) будет обеспечен при создании на время пуска *кругового* магнитного поля (см. подразд. 9.8), для чего МДС обеих обмоток должны быть равны, а токи обмоток сдвинуты по фазе на  $\pi/2$ .

Цепь пусковой обмотки, включающая конденсатор, соединяется с сетью только на период пуска. Пусковая обмотка рассчитывается только на кратковременное прохождение тока. После осуществления пуска цепь пусковой обмотки отключается с помощью реле или центробежного выключателя, и с сетью остается соединенной только рабочая обмотка. При этом на ротор вращающегося однофазного двигателя действует положительный момент  $M = M_{пр} - M_{обр}$ .

От однофазной сети может также работать *трехфазный асинхронный двигатель*. Одна из возможных схем его включения показана на рис. 10.2, б. При работе трехфазного двигателя от однофазной сети его пусковые и рабочие свойства хуже, чем при работе от трехфазной сети.

Конденсаторный двигатель отличается от однофазного тем, что цепь его обмотки, содержащая конденсатор (батарею конденсаторов), не отключается после пуска, а обеспечивает вращение магнитного поля в процессе работы двигателя. Это улучшает рабочие свойства двигателя. Обе обмотки конденсаторного двигателя рассчитываются на длительное прохождение тока. Конденсатор в этом случае является не пусковым, а рабочим.

Если пуск конденсаторного двигателя происходит при значительной нагрузке на валу, то для повышения пускового момента парал-

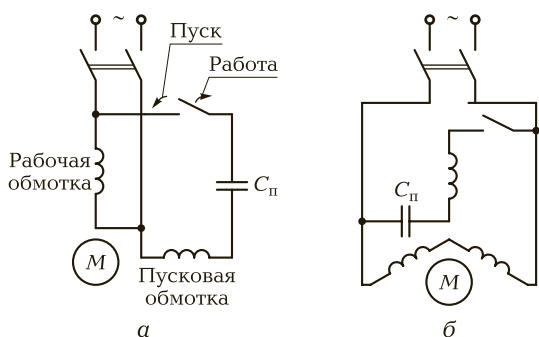


Рис. 10.2. Схемы соединения с однофазной сетью:

а — однофазного асинхронного двигателя; б — трехфазного асинхронного двигателя (одна из схем)

тельно рабочему конденсатору на время пуска включают пусковой конденсатор. После разгона двигателя пусковой конденсатор следует отключить, так как при малых скольжениях в цепи обмотки статора, содержащей индуктивное и емкостное сопротивления, может возникнуть условие резонанса напряжений, при котором напряжение на обмотке и конденсаторе может превысить напряжение сети в 2—3 раза.

### 10.3. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Исполнительный асинхронный двигатель предназначен для преобразования электрического сигнала в механическое перемещение в системах управления и регулирования (исполнительные двигатели постоянного тока рассмотрены в подразд. 3.9).

Исполнительные асинхронные двигатели отличаются прямолинейностью механической характеристики, большим пусковым моментом, возможностью плавного регулирования частоты вращения в широких пределах, отсутствием трущихся контактов. Эти двигатели изготавливают на мощности от долей ватта до сотен ватт и на частоту напряжения от 50 Гц до 500 Гц (в последнем случае обеспечивается частота вращения поля до 30 000 об/мин).

На статоре исполнительного асинхронного двигателя помещают две однофазные обмотки, сдвинутые в пространстве на 90 эл. град. Последовательно с одной из обмоток обычно включают конденсатор для обеспечения фазового сдвига между токами двух обмоток. Названные особенности исполнительного двигателя повторяют основные черты конденсаторного двигателя (см. подразд. 10.2). Однако в отличие от последнего, две обмотки статора исполнительного двигателя получают питание не от одной и той же однофазной сети, а от двух различных источников. Одна из обмоток — *о б м о т к а в о з б у ж д е н и я* — постоянно включена в однофазную сеть. В цепь именно этой обмотки чаще всего включают конденсатор. На вторую обмотку — *о б м о т к у у п р а в л е н и я* — подают управляющее напряжение. Это может осуществляться через усилитель системы управления. Посредством усилителя может быть также создан необходимый фазовый сдвиг, и в этом случае конденсатор в цепи возбуждения отсутствует.

Ранее отмечалась прямолинейность механической характеристики исполнительного асинхронного двигателя — зависимости электромагнитного момента от скольжения (см. подразд. 9.5). Для полу-

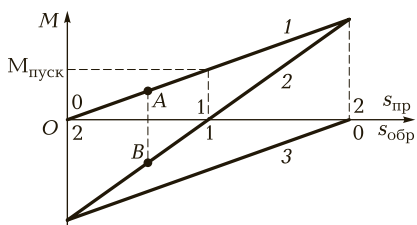


Рис. 10.3. Механические характеристики исполнительного асинхронного двигателя:

1 — при вращении магнитного поля статора в прямом направлении; 2 — при отсутствии управляющего напряжения; 3 — при вращении поля статора в обратном направлении

чения прямолинейной механической характеристики необходимо, чтобы обмотка ротора обладала высоким активным сопротивлением. Действительно, из сравнения двух характеристик, показанных на рис. 9.6, видно, что характеристика, соответствующая увеличенному активному сопротивлению обмотки ротора  $R_{22}$ , монотонно возрастает на большем интервале значений скольжения, чем характеристика, соответствующая меньшему сопротивлению  $R_{21}$ . При дальнейшем увеличении сопротивления можно добиться возрастания характеристики и ее приближенности к линейной зависимости для значений скольжения вплоть до  $s = 2$ , что иллюстрирует характеристика 1 на рис. 10.3.

При наличии напряжения на обеих обмотках статора магнитное поле машины является вращающимся (см. подразд. 10.2). Когда на управляющую обмотку напряжение перестает поступать, в машине действует только пульсирующее поле обмотки возбуждения, которое согласно рассуждениям, приведенным в подразд. 10.2, представляется как результат наложения двух вращающихся в противоположные стороны полей. Характеристика 1 на рис. 10.3 соответствует прямовращающемуся магнитному полю, характеристика 3 — обратновращающемуся, а характеристика 2 — результату наложения двух полей, т. е. пульсирующему полю (ордината каждой точки характеристики 2 является алгебраической суммой ординат соответствующих точек характеристик 1 и 3).

Если при наличии управляющего напряжения режим работы двигателя определяет точка A характеристики 1, то в тот момент времени, когда управляющее напряжение отключается, режим работы определяется точкой B характеристики 2, так как эта точка соответствует тому же скольжению (той же частоте вращения). Точке A соответствует положительный электромагнитный момент, а точке B — отрицательный. Это означает, что *при отключении управляющего напряжения будет происходить торможение двигателя*. Таким образом, двигатель, обмотка ротора которого имеет высокое

сопротивление, характеризуется отсутствием *самохода*, т. е. он останавливается после прекращения подачи управляющего напряжения.

Для обеспечения высокого сопротивления ротора его выполняют в виде тонкостенного алюминиевого стакана, аналогично полюму ротору исполнительного двигателя постоянного тока. Тем самым одновременно решается еще одна задача — *обеспечение малоинерционности двигателя*. Такой двигатель очень быстро достигает установившейся частоты вращения. Этому же способствует значительный пусковой момент. Действительно, согласно характеристике *1*, вращающий момент двигателя, еще не пришедшего во вращение (когда скольжение равно единице), имеет более высокое значение, чем при вращении двигателя в прямом направлении (при скольжении, меньшем единицы).

Исполнительный двигатель с полым ротором имеет два статора: внешний и внутренний. На внешнем статоре помещены обмотки, а внутренний, находящийся внутри полого ротора, служит для уменьшения магнитного сопротивления.

## 10.4. СИНХРОННАЯ СВЯЗЬ АСИНХРОННЫХ МАШИН

Синхронная связь машин обеспечивает одновременное вращение двух или большего числа валов, не связанных друг с другом механически (система «электрического вала»), либо одновременный поворот валов на заданный угол (система «передачи угла»). Такие системы используются для дистанционного управления, контроля и регулирования.

**Система «электрического вала».** Эта система показана на рис. 10.4. Одинаковые асинхронные двигатели *M1* и *M2* с фазным ротором приводят в движение рабочие механизмы, которые находятся на значительном расстоянии друг от друга и не могут быть связаны общим

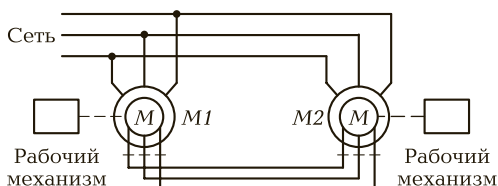


Рис. 10.4. Система «электрического вала»

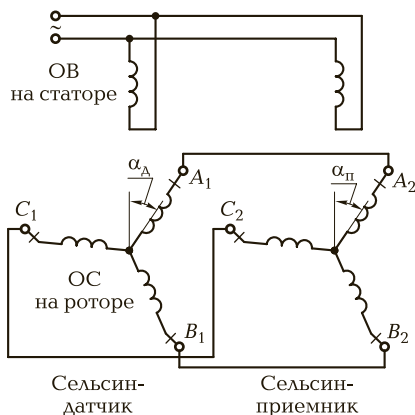
валом. При этом требуется обеспечить равенство частот вращения механизмов.

Для получения «электрического вала» каждый вывод обмотки ротора одного двигателя электрически соединяют с соответствующим выводом обмотки ротора второго двигателя. Если роторы вращаются синхронно, тогда ток каждой фазы обмотки ротора двигателя  $M1$  равен току соответствующей фазы обмотки ротора двигателя  $M2$ , и по фазе эти токи совпадают. В проводах, соединяющих выводы обмоток роторов, токи в этом случае направлены встречно, и тогда суммарный ток, который протекает в каждом из соединительных проводов и в каждой фазе обмотки ротора, равен нулю.

Если же один из двигателей начнет испытывать большую нагрузку на валу, чем другой, то частота его вращения уменьшится и суммарный ток в каждом соединительном проводе и в фазах обмоток приобретет ненулевое значение. (Учтем, что результат сложения токов зависит как от значений слагаемых токов, так и от разности фаз между ними.) Магнитное поле ротора каждого из двух двигателей, возникшее при протекании токов, взаимодействует с вращающимся магнитным полем статора. В результате этого взаимодействия в асинхронных двигателях возникают электромагнитные моменты, направленные так, *чтобы устранить причину, вызвавшую появление токов*. (Напомним, что явления, объясняющие принцип действия асинхронного двигателя, рассмотренные в подразд. 9.1, приводят к появлению электромагнитного момента, направленного так, чтобы ток ротора уменьшился.) При объединении двигателей в систему «электрического вала» возникает момент, ускоряющий вращение двигателя, получившего дополнительную механическую нагрузку, и момент, замедляющий вращение второго двигателя. Действие этих моментов приводит к восстановлению синхронности вращения двух двигателей.

**Система «передачи угла».** Состоит из двух машин, одна из которых является датчиком угла поворота, а другая — приемником. Эти машины называются сельсинами (от *англ.* self-synchronizing — самосинхронизирующийся). Возможна работа одного сельсина-датчика на несколько сельсинов-приемников. По конструкции сельсин подобен асинхронному двигателю с фазным ротором, на статоре которого помещена однофазная обмотка, включенная в однофазную сеть переменного тока и являющаяся обмоткой возбуждения (ОВ) (рис. 10.5). Трехфазная обмотка синхронизации (ОС) расположена на роторе. Обмотка ротора соединена с внешними выводами через скользящие контакты колец и щеток. Соответственные выводы обмоток роторов датчика и приемника

Рис. 10.5. Система «передачи угла»



электрически соединены между собой. (Применяется также обратное расположение обмоток, когда однофазную обмотку возбуждения помещают на роторе, а трехфазную обмотку синхронизации — на статоре.)

При протекании однофазного тока по обмоткам возбуждения сельсинов создаются пульсирующие магнитные поля. Они индуцируют ЭДС в каждой фазе обмоток синхронизации. Эти ЭДС совпадают по фазе (поскольку индуцируются одновременно), но различаются по значениям, которые зависят от положения каждой фазы обмотки синхронизации относительно обмотки возбуждения. Например, если в фазе  $A$  сельсина-датчика индуцируется ЭДС с амплитудой  $E_m \cos \alpha_A$ , то амплитуды ЭДС в фазах  $B$  и  $C$  будут при этом равны соответственно  $E_m \cos(\alpha_A - 2\pi/3)$  и  $E_m \cos(\alpha_A - 4\pi/3)$  (здесь  $E_m$  — максимальная амплитуда ЭДС, которая имеет место при совпадении оси поля обмотки возбуждения с осью поля одной из фаз обмотки синхронизации).

Если роторы датчика и приемника расположены одинаково относительно обмоток возбуждения ( $\alpha_A = \alpha_П$ ), то в одинаковых фазах обмоток синхронизации датчика и приемника будут индуцироваться равные ЭДС. Поскольку каждая фаза датчика соединена с соответствующей фазой приемника, ЭДС будут попарно компенсировать друг друга, и токов в линиях связи не будет. Такое положение роторов называется *согласованным*.

Если ротор датчика повернуть, нарушив равенство углов  $\alpha_A$  и  $\alpha_П$ , то прежнего равенства ЭДС не будет. В обмотках синхронизации и линиях связи возникнут уравнивающие токи. В результате взаимодействия магнитных полей обмоток синхронизации обоих сель-

синов с магнитными полями обмоток возбуждения создаются вращающие *синхронизирующие моменты*, стремящиеся повернуть роторы сельсинов так, чтобы они снова заняли согласованное положение. Если ротор сельсина-датчика удерживать в определенном положении, а ротору сельсина-приемника предоставить возможность вращаться, то он повернется, восстанавливая равенство углов.

Однако угол поворота  $\alpha_A$ , заданный в датчике, воспроизводится ротором приемника с некоторой ошибкой, называемой *углом рассогласования*:  $\theta = \alpha_A - \alpha_{\Pi}$ . Причиной рассогласования является необходимость преодоления противодействующих моментов, обусловленных силами трения в подшипниках и скользящих контактах, а в отдельных случаях еще и полезной нагрузкой на валу сельсина-приемника.

Угол рассогласования может быть снижен применением *бесконтактных сельсинов*, в которых, в отличие от *контактных*, описанных ранее, отсутствуют скользящие контакты. В бесконтактных сельсинах обмотки возбуждения и синхронизации помещают на статоре, а ротор представляет собой цилиндр, набранный из листов электротехнической стали и разделенный на два полюса промежутком из немагнитного материала (алюминия). Существенно то, что немагнитный промежуток не перпендикулярен оси ротора, а расположен косо. При вращении такого ротора будет меняться в пространстве направление магнитного поля, созданного обмоткой возбуждения, несмотря на то, что обмотка остается неподвижной. Помимо более высокой точности в воспроизведении угла по сравнению с контактными сельсинами, бесконтактные сельсины характеризуются большей надежностью.

## 10.5. АСИНХРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ. ЛИНЕЙНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

**Асинхронный преобразователь частоты (АПЧ).** Представляет собой асинхронный двигатель с фазным ротором. Обмотка его статора подключается к трехфазной сети переменного напряжения частотой  $f_1$ . В обмотке ротора при этом наводится ЭДС с частотой  $f_2$ , зависящей от частоты вращения ротора:  $f_2 = sf_1$ , где скольжение  $s$  определяется частотой вращения магнитного поля статора  $n_1$  и частотой вращения ротора  $n_2$ :  $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$  (см. формулы (9.7) и (9.2)).



Объединяя указанные формулы, запишем уравнение частоты ЭДС асинхронного преобразователя частоты:

$$f_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1} f_1. \quad (10.6)$$

Отличия АПЧ от асинхронного двигателя состоят в следующем:

- в асинхронном двигателе обмотка ротора замыкается на коротко или на регулировочный или пусковой реостат, а в АПЧ выводы обмотки ротора присоединяются к выходным зажимам этого преобразователя;
- ротор АПЧ вращается от приводного двигателя; таким образом, значение скольжения, а значит, и частота индуцируемой в преобразователе ЭДС задаются частотой вращения приводного двигателя  $n_2$ .

В качестве приводного может применяться как двигатель постоянного тока (когда требуется плавная регулировка частоты выходного напряжения), так и асинхронный или синхронный двигатель (при необходимости получения одной определенной частоты).

Вращение приводного двигателя может происходить как в сторону вращения магнитного поля статора АПЧ, так и в противоположную сторону. В первом случае частота вращения приводного двигателя  $n_2$  будет положительной (при  $n_2 < n_1$ ), и частота выходного напряжения АПЧ  $f_2$  согласно уравнению (10.6) будет меньше частоты напряжения  $f_1$  сети, питающей АПЧ. Во втором случае частота вращения приводного двигателя отрицательна, и при этом частота напряжения на выходе преобразователя получается больше, чем частота питающего напряжения. В первом из рассмотренных случаев АПЧ работает в двигательном режиме, а во втором — в режиме торможения противовключением (см. подразд. (9.9)).

Часто АПЧ применяют для получения повышенной частоты — 100 или 200 Гц (такие частоты нужны в ряде случаев для питания электроинструмента). Покажем, как с помощью асинхронного преобразователя частоты получают частоту 200 Гц.

Пусть частота вращения приводного двигателя равна 3 000 об/мин, и он вращает АПЧ в сторону, противоположную направлению вращения магнитного поля преобразователя, так что следует принять  $n_2 = -3\,000$  об/мин. Пусть число пар полюсов обмоток статора преобразователя частоты  $p = 3$ . Тогда, при питании АПЧ от сети с частотой напряжения  $f_1 = 50$  Гц, частота вращения поля его статора составит

$$n_1 = 60 f_1 / p = 1\,000 \text{ об/мин}$$

(см. формулу (8.4)).

Подставляя значения  $n_1$  и  $n_2$  в уравнение (10.6) с учетом знака  $n_2$ , получим

$$f_2 = 4 f_1 = 200 \text{ Гц.}$$

**Линейный асинхронный двигатель.** Преобразует электрическую энергию в энергию поступательного движения. При этом исключается необходимость превращения вращательного движения в поступательное, что упрощает конструкцию приводимого в движение механизма и повышает его КПД. Линейные двигатели могут применяться на конвейерах, в эскалаторах, в подъемных механизмах, в металлообрабатывающих и ткацких станках, а также на транспорте в качестве тяговых двигателей, при этом возможно получение скорости движения до 500 км/ч.

Принцип действия линейного асинхронного двигателя легко понять, если представить статор и ротор обычного асинхронного двигателя разрезанными вдоль диаметра и развернутыми. Если разрезать и развернуть статор и пропустить по его обмотке трехфазную систему токов, то возникшее магнитное поле будет не вращающимся, а *бегущим*. Такой «развернутый» статор называется *индуктором*; он индуцирует ЭДС в короткозамкнутой обмотке «развернутого» ротора, называемого *вторичным элементом* (рис. 10.6). Магнитное поле токов, возникающее в стержнях вторичного элемента под действием индуцированной ЭДС, взаимодействует с бегущим полем индуктора, в результате чего возникают электромагнитные силы, стремящиеся переместить подвижную часть линейного двигателя относительно неподвижной. Таким образом, в основе принципа действия линейного двигателя лежит явление, неоднократно упоминаемое ранее: возникновение сил, действующих на проводники с током, когда они пересекают силовые линии магнитного поля.

Как и длина окружности статора обычного асинхронного двигателя, длина индуктора линейного двигателя  $l_{\text{и}}$  может быть выражена

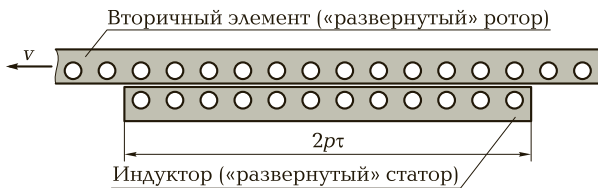


Рис. 10.6. Схематическое изображение линейного асинхронного двигателя

из числа полюсов  $2p$  и полюсного деления  $\tau$  как  $l_{\text{и}} = 2p\tau$ . За время, равное периоду  $T_1$  синусоидального напряжения, питающего индуктор, бегущее поле перемещается на расстояние двух полюсных делений  $2\tau$ , равное расстоянию между ближайшими одноименными полюсами (см. конец подразд. 8.2). Тогда скорость бегущего поля

$$v_1 = 2\tau/T_1 = 2\tau f_1, \quad (10.7)$$

поскольку период и частота — взаимно обратные величины.

Подобно вращению ротора во вращающемся поле статора, ступенчатое движение вторичного элемента в бегущем поле индуктора происходит с некоторым скольжением, определяемым выражением, аналогичным выражению (9.2):

$$s = \frac{v_1 - v_2}{v_1},$$

где  $v_2$  — скорость движения вторичного элемента.

Номинальное скольжение линейного двигателя составляет 2...6 %.

В различных конструкциях линейного двигателя подвижной частью может являться как вторичный элемент, так и индуктор.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Каковы функции и принципы работы индукционного регулятора и фазорегулятора? В чем заключается различие этих аппаратов?
2. При каком условии однофазный асинхронный двигатель приходит во вращение? Объясните возможность вращения ротора в случае, если магнитное поле статора является не вращающимся, а пульсирующим.
3. Каким образом осуществляется пуск однофазного асинхронного двигателя? Какой двигатель называется конденсаторным?
4. Какие функции выполняет каждая из двух обмоток исполнительного асинхронного двигателя?
5. Каковы особенности механической характеристики исполнительного двигателя; за счет чего достигаются эти особенности и как они сказываются на свойствах двигателя?
6. Объясните смысл термина «электрический вал». Каков принцип работы системы «электрического вала»?
7. Опишите назначение и принцип работы сельсинов.

## СИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

**11.1. ОБЩИЕ ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ**

**Общие особенности синхронных генераторов.** Синхронные генераторы, являющиеся источниками переменного тока, вырабатывают подавляющую долю электроэнергии в мире ввиду важных преимуществ переменного тока перед постоянным. Во-первых, переменный ток легко и с малыми потерями трансформируется — преобразуется в высокое напряжение, необходимое для передачи электроэнергии на большие расстояния, а также в низкое напряжение, необходимое для питания приемников электроэнергии. Во-вторых, генераторы переменного тока имеют более простое устройство, надежнее в работе и проще в эксплуатации, чем генераторы постоянного тока. Названные преимущества особенно проявляются при использовании трехфазных синхронных генераторов. В тех случаях, когда требуется постоянный ток (в частности, для электрохимического производства, транспорта и связи), его получают, главным образом, выпрямлением переменного тока.

Отметим, что в настоящее время становится все более распространенной передача электроэнергии в виде постоянного тока. При передаче постоянного тока отсутствуют некоторые механизмы старения изоляции кабелей, которые имеют место при передаче переменного тока; имеется возможность реверса потока мощности и передачи очень больших мощностей; система электропередачи постоянного тока работает более устойчиво и с меньшими потерями в линиях электропередач (ЛЭП); отпадает необходимость в синхронизации работы электростанций. Однако и в этом случае вырабатывается и трансформируется не постоянное, а переменное напряжение, которое затем преобразуется в постоянное (выпрямляется) на одном конце линии и снова преобразуется в переменное (инвертируется) на другом конце.

Трехфазные синхронные генераторы имеют различные конструктивные исполнения. Конкретный тип конструкции в большой степени зависит от свойств первичного двигателя, который приводит во вращение вал генератора (в частности, от частоты его вращения). Тем не менее общее устройство и назначение основных частей этих машин одинаковы. Основными частями любого синхронного генератора являются неподвижный статор с обмоткой, предназначенной для получения ЭДС (обмотка такого назначения называется *якорной*), и ротор с обмоткой возбуждения, питаемой от какого-либо источника постоянного напряжения. Необходимость в таком источнике является недостатком данного вида машин, но мощность, потребляемая цепью возбуждения, составляет всего 0,3...3,0 % от мощности, вырабатываемой генератором (способы возбуждения синхронных генераторов, т. е. способы питания обмотки возбуждения, рассмотрены в подразд. 11.7).

Статоры синхронных и асинхронных машин имеют аналогичные конструкции, и устройства их обмоток также аналогичны (см. подразд. 8.2). При диаметре статора более 1 м каждый кольцевой слой его шихтованного сердечника составляют из отдельных пластин — сегментов. Главное различие указанных видов машин касается ротора. В синхронном генераторе и в синхронном двигателе ротор представляет собой электромагнит, причем число его полюсов может равняться двум, а может составлять несколько десятков (вплоть до 108).

На рис. 11.1, а схематически изображена трехфазная синхронная машина, ротор которой имеет два полюса (число пар полюсов  $p = 1$ ). Обмотка ротора (обмотка возбуждения) соединена с источником постоянного напряжения посредством скользящих контактов колец

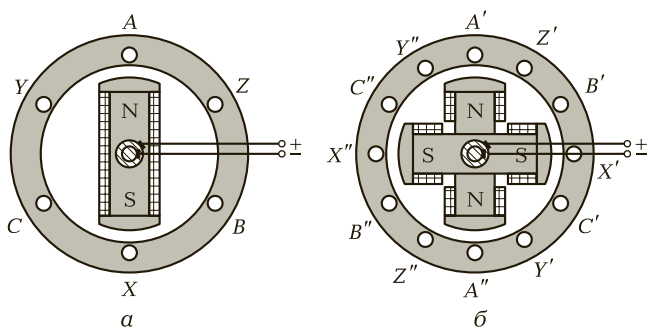


Рис. 11.1. Схематическое изображение трехфазной синхронной машины: а — с двумя полюсами; б — с четырьмя полюсами

и щеток. Показана простейшая трехфазная обмотка статора — однослойная сосредоточенная, имеющая три катушки  $AХ$ ,  $ВУ$ ,  $СΖ$ , смещенные в пространстве одна относительно другой на угол  $120^\circ$  (на рис. 11.1 показаны только активные стороны катушек, перпендикулярные плоскости чертежа (сравнить с рис. 8.3, а)).

Машина, изображенная на рис. 11.1, б, имеет ротор с четырьмя полюсами ( $p = 2$ ). Однослойная сосредоточенная обмотка статора содержит в этом случае шесть катушек — по две последовательно соединенные катушки на фазу:  $A'X'$  и  $A''X''$  (ср. с рис. 8.3, б);  $B'Y'$  и  $B''Y''$ ;  $C'Z'$  и  $C''Z''$ . Центральный угол между ближайшими катушками, принадлежащими разным фазам, составляет  $60^\circ = 120$  эл. град. (см. выражение (10.3)), как угол между катушками  $A'X'$  и  $B'Y'$ .

**Принцип действия синхронного генератора.** Когда к обмотке возбуждения подводится постоянный ток, вокруг ротора создается магнитное поле, конфигурация которого зависит от числа полюсов. При вращении ротора первичным двигателем с частотой  $n$  это поле вращается вместе с ротором. Силовые линии поля ротора пересекают активные проводники обмотки статора, в которых при этом наводятся переменные ЭДС. Полный цикл изменения мгновенного значения ЭДС в каждой фазе обмотки статора происходит за время поворота ротора на угол, соответствующий двум полюсным делениям, т. е. расстоянию между серединами *одноименных* полюсов (этот угол равен  $360^\circ/p = 360$  эл. град.).

В случае  $p = 1$  за один оборот ротора происходит один цикл изменения ЭДС, и тогда 1 эл. град. =  $1^\circ$ . При этом частота ЭДС каждой фазы обмотки статора, выраженная в герцах, равна  $f = n/60$ , где частота вращения ротора  $n$  выражена в оборотах в минуту.

В случае  $p > 1$ , когда за один оборот ротора происходит  $p$  циклов изменения ЭДС, имеем

$$f = \frac{pn}{60} \quad (11.1)$$

(сравнить с выражением (8.4)).

Из-за пространственного смещения фаз обмотки статора их ЭДС смещены во времени одна относительно другой на  $1/3 T$  периода ЭДС, что соответствует смещению по фазе на  $2\pi/3$  рад. В предположении синусоидального характера ЭДС их мгновенные значения описываются выражениями:

$$e_A = E_m \sin \omega t; \quad e_B = E_m \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right); \quad e_C = E_m \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right), \quad (11.2)$$

где угловая частота  $\omega = 2\pi f$ .

На практике ЭДС, приближающаяся к синусоидальной, получается лишь в случае распределенной обмотки с укороченным шагом (см. подразд. 8.2).

Если к выводам генератора подключена трехфазная симметричная нагрузка, то в отдельных частях (фазах) этой нагрузки будут протекать токи, определяемые выражениями (8.1) (но в общем случае аргументы синусов в выражениях токов отличаются от аргументов синусов в выражениях ЭДС на слагаемое  $\psi_0$ , определяемое, в частности, характером нагрузки). Зависимости от времени мгновенных значений токов фаз обмотки статора (или фаз трехфазной нагрузки) показаны на рис. 8.1, а.

В подразд. 8.1 выяснено, что трехфазная система токов, протекающих по обмоткам статора, создает вращающееся магнитное поле, частота вращения которого определяется частотой тока и числом пар полюсов согласно выражению (8.4). Приходим к выводу, что *частота вращения магнитного поля статора синхронного генератора равна частоте вращения его ротора, т. е. поля статора и ротора неподвижны друг относительно друга*. Эта общая частота вращения  $n$  называется *синхронной частотой*.

Если на статоре синхронного генератора имеется однофазная обмотка, представленная катушкой АХ на рис. 11.1, а или последовательно соединенными катушками А'Х' и А''Х'' на рис. 11.1, б, то генератор является *однофазным синхронным*. При этом остается прежним число полюсов ротора. Выражение частоты ЭДС  $f$  (11.1) и выражение мгновенного значения ЭДС  $e_A$  (11.2) остаются справедливыми.

В основе работы синхронного генератора и генератора постоянного тока лежат одни и те же явления (см. подразд. 1.1). Основное отличие двух названных видов машин состоит в том, что в конструкции генератора постоянного тока предусмотрен коллектор — устройство, обеспечивающее неизменность направления тока в нагрузке, синхронный же генератор не имеет коллектора.

Другим конструктивным отличием является иное назначение вращающейся и неподвижной частей машины: в машине постоянного тока обмотка возбуждения помещена на полюсах статора, а обмотка якоря — на роторе. Напротив, во всех мощных синхронных генераторах обмотка якоря помещена на статоре, что исключает необходимость применения скользящих контактов в цепи нагрузки, имеющей высокую мощность и напряжение. Наличие скользящих контактов в цепи якоря привело бы к большим проблемам, связанным с дугообразованием. Кольца и щетки в цепи возбуждения синхронной машины к трудностям такого рода не приводят, поскольку мощность и напряжение этой цепи значительно меньше.

## 11.2. ТИПЫ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

**Турбогенератор.** Первичным двигателем турбогенератора является паровая или газовая турбина тепловой (ТЭС) или атомной электростанции (АЭС), вращающаяся под действием пара или газа высокого давления, направленного на лопатки турбины. Вал турбогенератора расположен горизонтально и соединен с турбиной непосредственно. Турбогенератор в разрезе показан на рис. 11.2.

В зависимости от мощности турбогенераторы подразделяются на следующие основные группы: мощностью 25—63 МВт; 100—200 МВт; 300—500 МВт; 800 МВт; свыше 1000 МВт. Так, на Костромской ГРЭС эксплуатируется турбогенератор ТВВ-1200-2 мощностью 1 200 МВт (напряжение статора 24 кВ, напряжение возбуждения 517 В), изготовленный на заводе «Электросила» (Санкт-Петербург).

По частоте вращения различают турбогенераторы четырехполюсные (на частоту вращения 1 500 об/мин) и двухполюсные (на частоту вращения 3 000 об/мин). В настоящее время также производятся турбогенераторы на частоту вращения 6 000 об/мин, вырабатывающие ЭДС частотой 100 Гц (в этом случае между генератором и сетью устанавливается преобразователь частоты, снижающий частоту до 50 Гц).

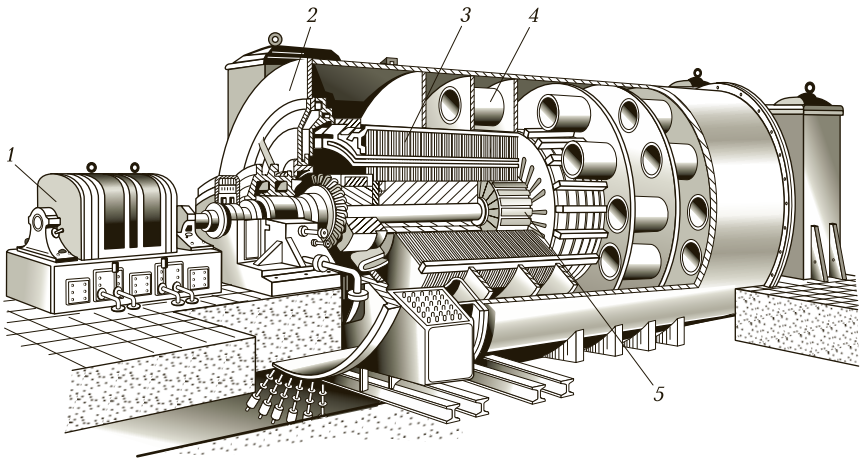
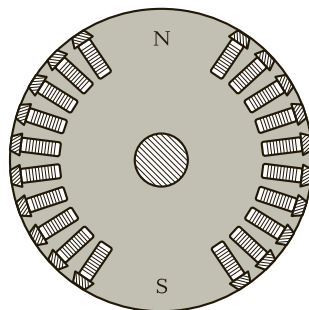


Рис. 11.2. Турбогенератор:

1 — возбудитель (генератор постоянного тока, питающий обмотку возбуждения синхронного генератора); 2 — корпус; 3 — сердечник статора; 4 — секции водородного охлаждения; 5 — ротор



Рис. 11.3. Поперечный разрез ротора с неявно выраженными полюсами



Роторы турбогенераторов выполняют *неявнополюсными*, т. е. с неявно выраженными полюсами (рис. 11.3). Такой ротор в значительно большей степени отвечает требованиям механической прочности при высокой частоте вращения, чем явнополюсный ротор (см. рис. 11.1). Роторы мощных турбогенераторов изготавливают из высококачественной хромоникелевой или хромоникельмолибденовой стали. Для обеспечения необходимой механической прочности при частоте вращения 3000 об/мин диаметр ротора не должен превышать 1,25 м, а для обеспечения механической жесткости активная длина ротора должна быть не более 6 м. Прямоугольные пазы на поверхности ротора выполняют фрезерованием. Катушки обмотки возбуждения, уложенные в пазах, укрепляют клиньями из немагнитного металла (алюминия). Немагнитные клинья ослабляют магнитные потоки рассеяния, возникающие в области пазов. (Потоки рассеяния вызывают магнитное насыщение зубцов ротора, что приводит к уменьшению полезного магнитного потока.)

Вал ротора вращается в подшипниках, установленных в подшипниковых щитах. В настоящее время для генераторов с высокой частотой вращения (6 000 об/мин) стали применяться *магнитные подшипники*, которые обеспечивают очень низкий уровень вибрации и не требуют смазки (отсутствуют трущиеся детали).

**Гидрогенератор с вертикальным валом.** Первичным двигателем синхронного гидрогенератора является гидравлическая турбина гидроэлектростанции (ГЭС) или гидроаккумулирующей электростанции (ГАЭС), вращающаяся под действием напора падающей воды. Вал гидрогенератора расположен вертикально и соединен с гидравлической турбиной непосредственно. Гидрогенератор в разрезе показан на рис. 11.4.

Гидрогенераторы являются тихоходными машинами. Частота вращения гидравлической турбины и, значит, ротора гидрогенера-

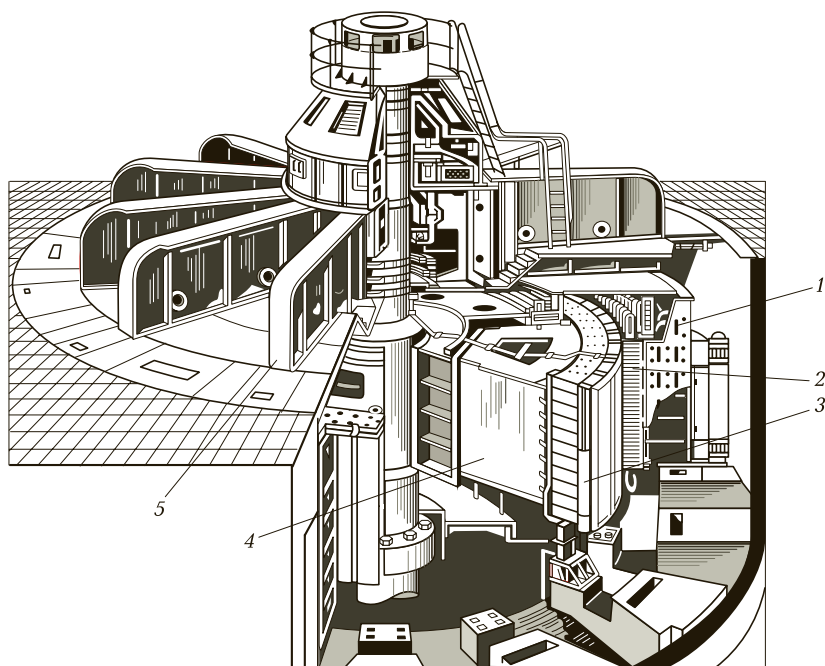


Рис. 11.4. Гидрогенератор подвесного типа:

1 — корпус статора; 2 — сердечник статора; 3 — полюс ротора; 4 — обод ротора; 5 — верхняя опорная крестовина

тора зависит от напора воды и мощности турбины. Так, например, турбина, вращающая гидрогенератор СВ-712/227-24 (синхронный вертикальный генератор с наружным диаметром 712 см и длиной активной стали статора 227 см), совершает 250 об/мин, а частота вращения генератора СВ-1500/170-96 составляет всего 62,5 об/мин (около одного оборота в секунду). Все отечественные гидрогенераторы вырабатывают электроэнергию при частоте 50 Гц. Согласно формуле (11.1) это означает, что число пар полюсов первого генератора, приведенного в качестве примера, равно  $p = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{250} = 12$

(т. е. число его полюсов равно 24, на что указывает последнее число в буквенно-цифровом обозначении типа генератора), а число пар полюсов второго генератора равно 48 (96 полюсов). Минимальное число полюсов гидрогенератора 8, максимальное — 108. Полюсы гидрогенераторов выполняют явновыраженными; они крепятся на кольцевом ободе 4 (см. рис. 11.4), являющемся одновременно

ярмом магнитной системы машины, через которое замыкаются магнитные потоки полюсов.

Ввиду больших размеров статоров гидрогенераторов их выполняют разъемными — состоящими чаще всего из шести равных частей.

Вес вращающейся части гидрогенератора с вертикальным расположением вала, а также давление воды на рабочее колесо турбины воспринимается **п о д п я т н и к о м**. Подпятник представляет собой подшипник скольжения, состоящий из вращающейся части — **п я т ы**, выполненной в виде диска, укрепленного на роторе, и неподвижной части, находящейся под пятой. Между подвижной и неподвижной частями подпятника имеется слой смазки. Нагрузка на подпятник мощного генератора составляет несколько тысяч тонн.

По расположению подпятника относительно сердечника ротора вертикальные генераторы бывают подвесного и зонтичного типа.

В генераторе подвесного типа подпятник расположен на верхней опорной крестовине 5 (см. рис. 11.4) выше сердечника ротора. При этом достигается наибольшая механическая устойчивость вращающегося ротора, но для опоры подпятника требуется массивная крестовина. Гидрогенераторы подвесного типа имеют, как правило, сравнительно большую скорость вращения и ограниченный диаметр ротора и статора.

В генераторе зонтичного типа подпятник расположен на нижней крестовине, ниже сердечника ротора. Эта конструкция более приемлема для тихоходных генераторов с большим диаметром ротора и статора.

Помимо подпятников на валу гидрогенераторов устанавливают один или два направляющих подшипника, воспринимающих только радиальные усилия.

Наиболее мощные гидрогенераторы функционировали на Саяно-Шушенской ГЭС, расположенной на реке Енисей. Мощность каждого из них составляла 715 МВ·А, частота вращения 143 об/мин ( $2p = 42$  полюса), внешний диаметр 15 м, диаметр ротора 12 м, длина магнитопровода статора 2,75 м.

Самый мощный гидрогенератор-двигатель в Европе (мощность 421 МВт) построен в Украине, на харьковском заводе «Электротяжмаш». Машина предназначена для Днестровской ГЭС и призвана решить имеющиеся проблемы с перепадами напряжения в электросетях. Как видно из сравнения с предыдущим примером, мощность харьковской машины не является наибольшей для гидрогенераторов, но особенность ее заключается в том, что она предназначена для

работы в двух режимах: генераторном и двигательном. (Гидрогенератор переводится в двигательный режим в часы минимума нагрузки энергосистемы; потребляя мощность из сети, такие агрегаты перекачивают воду по трубопроводу из нижнего бассейна электростанции в верхний.)

**Капсульный гидрогенератор.** Устанавливается непосредственно в потоке воды внутри водонепроницаемой капсулы 1 (рис. 11.5). Вал 3 расположен горизонтально. Подпятник 2 воспринимает осевую нагрузку от рабочего колеса 7 турбины, преобразующего энергию потока воды в механическую энергию. Вода поступает на рабочее колесо через направляющий аппарат 6 гидравлической турбины — рабочий орган турбины, изменяющий закрутку потока воды и регулирующий расход воды за счет поворота лопаток. Ротор 4 капсульного генератора выполняется явнополюсным.

Капсульные генераторы применяются на низконапорных гидростанциях и позволяют отказаться от машинного зала и достичь большей компактности и меньшей стоимости станции. Капсульные генераторы изготавливаются на мощности до нескольких десятков мегаватт.

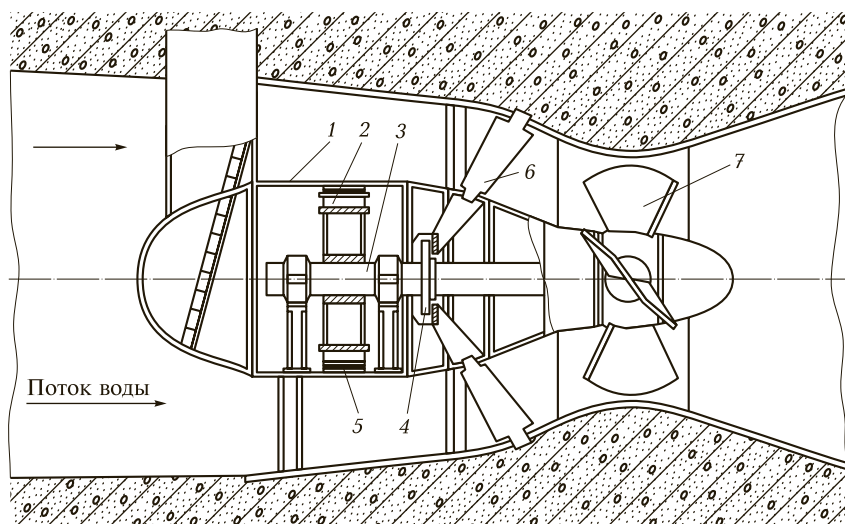


Рис. 11.5. Капсульный гидрогенератор:

1 — капсула; 2 — подпятник; 3 — вал; 4 — ротор; 5 — статор; 6 — направляющий аппарат турбины; 7 — рабочее колесо турбины

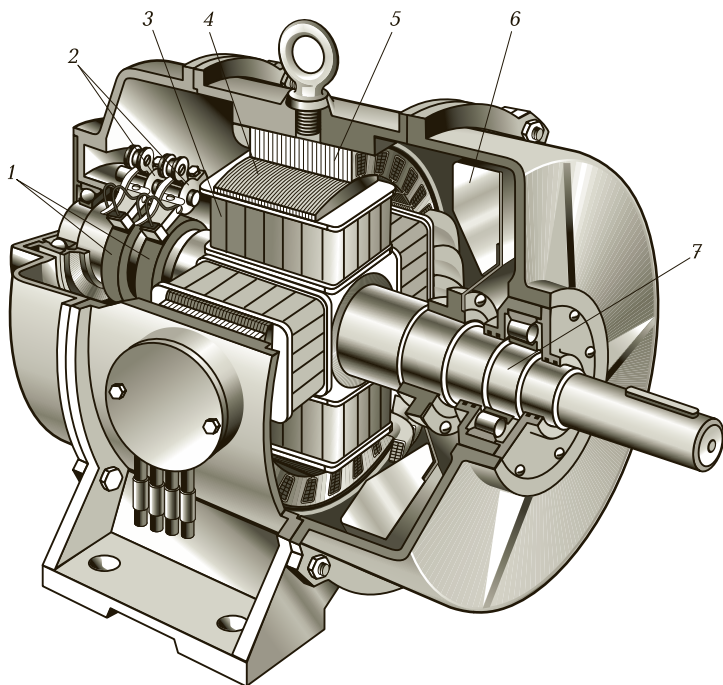


Рис. 11.6. Дизель генератор:

1 — контактные кольца; 2 — щеткодержатели; 3 — полюсная катушка; 4 — полюсный наконечник; 5 — сердечник статора; 6 — вентилятор; 7 — вал

**Дизель-генератор (рис. 11.6).** Это генератор малой мощности (до 1 ... 2 МВт), соединяемый с двигателем внутреннего сгорания. Расположение вала — горизонтальное. Возбудитель (т. е. генератор постоянного тока, питающий обмотку возбуждения синхронного генератора) может быть укреплен на фланце дизель-генератора и иметь с ним общий вал. Генераторы данного типа рассчитываются на частоту вращения 600 — 1 500 об/мин и имеют, таким образом, от пяти до двух пар полюсов, которые обычно выполняются явновыраженными. Обладая небольшой мощностью, дизель-генератор имеет ротор небольших размеров, поэтому даже при значительной частоте вращения 1 500 об/мин явнополюсный ротор удовлетворяет требованиям прочности. Дизель-генераторы применяются на передвижных и малых стационарных электростанциях.

Судовой дизель-генератор ДГМ-200/1500, предназначенный для электропитания корабля, имеет мощность 200 кВт и поперечный

размер 1,2 м. Дизель-генератор 1А-9ДГ, устанавливаемый на тепло-возах, обладает мощностью 2,2 МВт и имеет поперечный размер около 2 м.

### 11.3. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

**Понятие реакции якоря синхронного генератора.** При холостом ходе генератора, когда ток в его якорной обмотке (в обмотке статора) отсутствует, в сердечниках статора и ротора, а также в воздушном зазоре существует только *основной магнитный поток*  $\Phi_{\text{в}}$ , созданный магнитодвижущей силой  $F_{\text{в}}$  обмотки возбуждения (понятие магнитодвижущей силы упоминается в подразд. 1.6).

Когда генератор питает нагрузку, по обмотке якоря течет ток, с которым связана МДС якоря  $F_{\text{а}}$ . Эта МДС создает магнитный поток якоря  $\Phi_{\text{а}}$ , совпадающий по фазе с МДС.

**Примечание.** Ранее в обозначениях величин, относящихся к якорю электрической машины, использовался русский индекс «я». В обозначениях МДС, магнитного потока и сопротивлений якоря синхронной машины будет использоваться латинский индекс «а» (armature — якорь) как более традиционный в этих случаях.

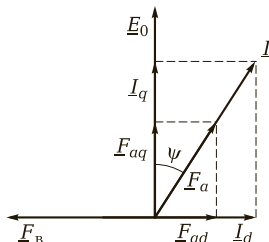
Основной магнитный поток  $\Phi_{\text{в}}$  вместе с потоком якоря  $\Phi_{\text{а}}$  образуют *результатирующий магнитный поток*  $\Phi$ .

Влияние МДС якоря на результирующий магнитный поток называется *реакцией якоря*. (Применительно к машинам постоянного тока реакция якоря обсуждалась в подразд. 1.6.) Как в машине постоянного тока, так и в синхронной машине реакция якоря зависит от значения тока якоря, от параметров генератора, от степени насыщения сердечников статора и ротора. Особенностью машины переменного тока является зависимость реакции якоря от характера нагрузки (активная, индуктивная, емкостная или смешанная).

При изучении реакции якоря в синхронной машине удобно применять *теорию двух реакций*, в которой поток, созданный обмоткой статора (якоря), представляют состоящим из *продольного* и *поперечного потоков*: продольный поток направлен вдоль оси полюсов, т. е. в направлении основного потока или против этого направления, а поперечный поток повернут относительно продольного на 90 эл. град.

**Реакция якоря при активно-индуктивной нагрузке.** На рис. 11.7 представлена векторная диаграмма магнитодвижущих сил и токов, порождающих эти МДС, при активно-индуктивной нагрузке гене-

Рис. 11.7. Векторная диаграмма токов и МДС синхронного генератора при активно-индуктивной нагрузке



ратора. Вектор ЭДС генератора в режиме холостого хода  $E_0$  повернут относительно вектора МДС  $F_b$  обмотки возбуждения на  $90^\circ$  в сторону отставания (ЭДС индукции отстает по фазе на  $90^\circ$  от создавшего ее потока; см. выражения (4.3)).

При указанном характере нагрузки ток нагрузки  $I$  (он же ток якоря) отстает по фазе от напряжения на выводах генератора  $U$  на некоторый угол  $\varphi$  (вектор  $\underline{U}$  и угол  $\varphi$  на диаграмме не показаны). Будем считать, что разность фаз между напряжением генератора  $U$  и ЭДС  $E_0$  невелика, и что ток  $I$  отстает также и от ЭДС  $E_0$ . Соответствующий угол сдвига фаз  $\psi$  показан на диаграмме.

Ток якоря  $I$  определяет магнитодвижущую силу якоря  $F_a$ , совпадающую с током по фазе. Проецируя вектор тока  $I$  на ось, вдоль которой направлен вектор МДС обмотки возбуждения  $F_b$ , получим реактивную составляющую тока якоря — *продольный ток*:

$$I_d = I \sin \psi. \quad (11.3)$$

Этот ток возбуждает продольную реакцию якоря, характеризующуюся МДС:

$$F_{ad} = F_a \sin \psi. \quad (11.4)$$

Видим, что вектор  $F_{ad}$  направлен против вектора  $F_b$ . Таким образом, *продольная реакция якоря при активно-индуктивной нагрузке оказывает размагничивающее действие на машину* (уменьшает магнитный поток).

*Поперечный ток* (активная составляющая тока якоря)

$$I_q = I \cos \psi \quad (11.5)$$

возбуждает поперечную реакцию якоря, характеризующуюся магнитодвижущей силой

$$F_{aq} = F_a \cos \psi. \quad (11.6)$$

Результирующая МДС машины получается сложением векторов  $F_b$  и  $F_a$ . В направлении результирующей МДС будет направлен и результирующий магнитный поток.

В *явнополюсной* машине продольный и поперечный потоки проходят через неодинаковые магнитные сопротивления; продольный поток встречает меньшее сопротивление. Действительно, вдоль продольной оси машины воздушный зазор (зазор между полюсным наконечником и внутренней поверхностью статора) существенно меньше, чем в направлении поперечной оси. Это обстоятельство учитывается коэффициентами реакции якоря  $k_d$  и  $k_q$  соответственно. Тогда расчетные величины МДС реакции якоря по продольной и по поперечной оси (соответственно  $F'_{ad}$  и  $F'_{aq}$ ) равны:

$$F'_{ad} = k_d F_{ad} = k_d F_a \sin \psi; \quad F'_{aq} = k_q F_{aq} = k_q F_a \cos \psi. \quad (11.7)$$

В *неявнополюсной* машине магнитное сопротивление по обеим осям одинаково. В этом случае нет необходимости во введении коэффициентов реакции якоря.

**Реакция якоря при активной нагрузке.** При активном характере нагрузки ток якоря  $I$  совпадает по фазе с напряжением  $U$  на выводах генератора. Несмотря на то что между напряжением  $U$  и ЭДС генератора  $E_0$  имеется ненулевая разность фаз, будем для удобства рассматривать случай совпадения по фазе тока не с напряжением, а с ЭДС  $E_0$ , когда  $\psi = 0$ . В этом случае ток якоря является *поперечным*:  $I = I_q$  (рис. 11.8, а). Поперечным является и магнитный поток якоря. МДС якоря  $F_{aq}$ , равная при этом  $F_{aq'}$ , совпадает по фазе с ЭДС  $E_0$  и отстает от МДС обмотки возбуждения  $F_b$  на угол  $90^\circ$ . Рассматриваемой векторной диаграмме соответствует рис. 11.8, б, изображенный для простейшего случая двухполюсной машины, когда углы сдвига фаз между величинами равны геометрическим углам между векторами

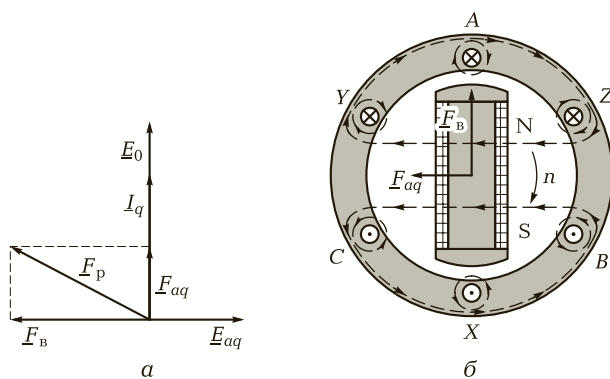


Рис. 11.8. Векторы МДС синхронного генератора при активной нагрузке: а — на векторной диаграмме; б — в пространстве



в пространстве. Вектор МДС обмотки возбуждения расположен вдоль средней линии магнитного поля ротора. Внутри ротора этот вектор направлен от его южного к северному полюсу, как и силовые линии магнитного поля ротора. Ротор вращается первичным двигателем по часовой стрелке. Поскольку МДС якоря  $F_{aq}$  отстает по фазе от МДС обмотки возбуждения  $F_b$  на  $90^\circ$ , то вектор  $\underline{F}_{aq}$  должен располагаться в пространстве (см. на рис. 11.8, б) под углом  $90^\circ$  к вектору  $\underline{F}_b$ , причем так, чтобы любое направление в пространстве сначала занимал вектор  $\underline{F}_b$ , а затем, через четверть периода вращения, вектор  $\underline{F}_{aq}$ . (Направление смещения в пространстве одного вектора относительно другого зависит от направления вращения ротора, а направление смещения на векторной диаграмме определяется условным правилом: отстающий вектор изображается смещенным по часовой стрелке относительно опережающего.)

Направление вектора  $\underline{F}_{aq}$ , показанное на рис. 11.8, б, связано правилом буравчика с направлениями тока в активных проводниках статора, показанными на том же рисунке. В рассматриваемый момент времени максимальный ток течет по катушке АХ.

Итак, в случае активной нагрузки генератора полюсы ротора при своем вращении направлены в сторону активных проводников обмотки статора, в которых в данный момент времени мгновенное значение тока максимально.

На рис. 11.8, б показаны силовые линии магнитных полей, созданных отдельными активными проводниками обмотки статора, а также суммарного поля, принадлежащего токам одного направления. Рассмотрим направления силовых линий магнитного поля якоря в верхней части рисунка по отношению к магнитному полю ротора. Под правым (набегающим) краем полюса силовые линии поля якоря направлены вниз, т. е. против поля ротора (основного магнитного поля). Под левым (сбегающим) краем полюса линии поля якоря направлены вверх, т. е. по направлению основного поля. Таким образом, поперечное поле якоря приводит к усилению результирующего поля генератора под одним краем полюса и к ослаблению результирующего поля под другим краем полюса (ср. с рассуждениями в подразд. 1.6). Вектор результирующей МДС  $\underline{F}_r$  показан на рис. 11.8, а. Очевидно, что поперечная реакция изменяет величину и фазу результирующей МДС (и результирующего потока). А это влияет на значение ЭДС статора, причем результат влияния поперечной реакции якоря на ЭДС зависит от степени насыщения магнитной цепи машины.

При *ненасыщенной* магнитной цепи поток и ЭДС изменяются пропорционально результирующей МДС. Величину ЭДС определяет векторное равенство

$$\underline{E} = \underline{E}_0 + \underline{E}_{aq}, \quad (11.8)$$

и ЭДС оказывается больше, чем при холостом ходе. (ЭДС  $E_{aq}$ , индуцированная поперечным потоком якоря, отстает по фазе от МДС  $F_{aq}$  на  $90^\circ$ , подобно тому как ЭДС  $E_0$  отстает по фазе от МДС  $F_b$ ).

В случае если магнитная цепь *близка к насыщению*, ослабление магнитного поля под набегающим краем полюса сильнее, чем его усиление под сбегающим краем (сравнить с подразд. 1.6). В итоге результирующий магнитный поток оказывается ослабленным по сравнению с основным потоком, созданным обмоткой возбуждения. С увеличением насыщения магнитной системы *увеличивается ее магнитное сопротивление*, и из-за этого ЭДС  $E_0$ , индуцированная обмоткой возбуждения, становится меньше ЭДС при холостом ходе. Что касается результирующей ЭДС  $E$ , определяемой равенством (11.8), то она, в зависимости от степени насыщения магнитной цепи, может быть как больше ЭДС, индуцированной обмоткой возбуждения при холостом ходе, так и меньше ее.

ЭДС  $E_{aq}$ , индуцированная поперечным потоком якоря, увеличивается с ростом поперечного тока  $I_q$ . Коэффициент пропорциональности между этими величинами имеет размерность сопротивления. Тогда, учитывая сдвиг фаз между ЭДС и током, можно записать

$$\underline{E}_{aq} = -jI_q x_{aq} \quad (11.9)$$

(ср., например, с выражением (5.5)).

Величина  $x_{aq}$  представляет собой индуктивное сопротивление, обусловленное поперечным потоком якоря.

**Реакция якоря при индуктивной нагрузке.** При индуктивной нагрузке генератора сдвиг фаз  $\psi$  между током якоря (статора)  $I$  и ЭДС  $E_0$ , индуцированной потоком возбуждения, составляет  $90^\circ$ ; поток якоря и ток являются продольными:  $I = I_d$  (рис. 11.9, а). МДС якоря  $F_{ad}$  отстает по фазе от ЭДС  $E_0$  на  $90^\circ$  и противоположна по фазе МДС обмотки возбуждения  $F_b$ . Рис. 11.9, б построен в соответствии с векторной диаграммой. Для удобства сопоставления с рис. 11.8, б снова отображен тот момент времени, когда в катушке статора АХ мгновенное значение тока максимально, причем в активном проводе А ток течет *от нас*. В таком случае пространственное направление вектора МДС якоря на рис. 11.9, б такое же, как и на рис. 11.8, б; однако в случае индуктивной нагрузки этот вектор обозначен  $\underline{F}_{ad}$ , а не  $\underline{F}_{aq}$  (реакция якоря продольная, а не поперечная). Как и на векторной диаграмме, на рис. 11.9, б вектор МДС обмотки возбуждения  $\underline{F}_b$  противоположен вектору МДС якоря  $\underline{F}_{ad}$ . Это и определяет положение ротора в пространстве в рассматриваемый момент времени. Таким образом, выяснено, что при индуктивной нагрузке ток

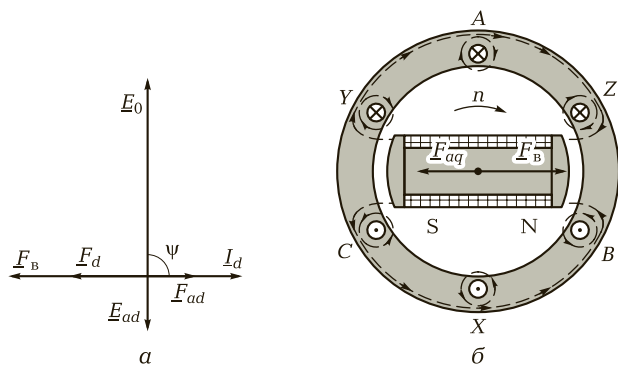


Рис. 11.9. Векторы МДС синхронного генератора при индуктивной нагрузке:

а — на векторной диаграмме; б — в пространстве

в фазе А статора приобретает максимальное значение лишь через четверть периода вращения ротора после прохождения им положения, при котором его полюсы направлены на активные проводники катушки АХ. Что же касается ЭДС  $E_0$ , индуцированной в катушке АХ основным магнитным потоком, то ее мгновенное значение оказывается наибольшим как раз в тот момент, когда полюсы направлены на проводники этой катушки (ЭДС  $E_0$  опережает МДС  $F_{ad}$  на  $90^\circ$ ).

Итак, при индуктивной нагрузке магнитная ось полюсов составляет с магнитной осью поля обмотки якоря угол  $180^\circ$  (в общем случае  $180$  эл. град.). Это означает, что при индуктивной нагрузке возбуждается *продольное размагничивающее поле якоря*, при которой результирующая ЭДС генератора меньше, чем ЭДС обмотки возбуждения.

Для продольной результирующей МДС  $F_d$  справедливо арифметическое равенство

$$F_d = F_b - F_{ad}. \quad (11.10)$$

Выражение для ЭДС  $E_{ad}$ , индуцируемой продольным потоком якоря, запишем аналогично выражению (11.9):

$$E_{ad} = -jI_d x_{ad}, \quad (11.11)$$

где  $x_{ad}$  — индуктивное сопротивление, обусловленное продольным потоком якоря.

**Реакция якоря при емкостной нагрузке.** При емкостной нагрузке генератора сдвиг фаз  $\psi$  между током якоря  $I$  и ЭДС  $E_0$  составляет  $90^\circ$ , но в отличие от случая индуктивной нагрузки ток является

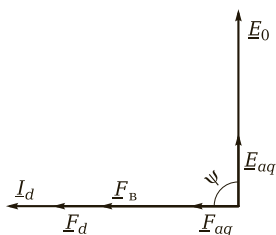


Рис. 11.10. Векторная диаграмма синхронного генератора при емкостной нагрузке

опережающим (рис. 11.10). МДС якоря  $F_{ad}$  совпадает по фазе с МДС обмотки возбуждения  $F_B$ , поэтому реакция якоря является *продольной намагничивающей*. В этом случае для результирующей МДС справедливо равенство

$$F_d = F_B + F_{ad}. \quad (11.12)$$

Результирующая ЭДС при этом превышает ЭДС, обусловленную обмоткой возбуждения. При большой электрической емкости цепи, питаемой генератором, могут возникнуть значительные перенапряжения.

Картину векторов в пространстве можно получить на основе рассуждений, аналогичных приведенным в данном подразд. В случае емкостной нагрузки вектор МДС обмотки возбуждения  $F_B$  совпадает по направлению с вектором МДС якоря  $F_{ad}$ . Тогда в момент времени, когда направления токов в активных проводниках статора соответствуют рис. 11.9, б, ротор займет горизонтальное положение, противоположное положению при индуктивной нагрузке. Ток в катушке АХ принимает максимальное значение за четверть периода до того, как полюсы ротора будут обращены к активным проводникам этой катушки.

## 11.4. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

**Полная (основная) векторная диаграмма.** Векторная диаграмма синхронного генератора позволяет решить ряд задач. Чаще всего решается задача нахождения необходимого тока возбуждения  $I_B$  (или соответствующей ЭДС обмотки возбуждения  $E_0$ ) при заданном напряжении на выводах генератора  $U$ , токе нагрузки  $I$  и характере нагрузки, определяемом фазовым углом  $\varphi$ . Иногда по заданным значениям ЭДС  $E_0$ , тока  $I$  и углу сдвига фаз между ними  $\psi$  требуется

определить напряжение  $U$ . С помощью векторной диаграммы можно построить характеристики генератора (сведения о характеристиках приведены далее (см. подразд. 11.5)), выявить условия включения генераторов на параллельную работу.

При построении векторной диаграммы *явнополюсного генератора* рассматривают по отдельности продольную и поперечную реакции якоря. Полная векторная диаграмма (рис. 11.11, а) отображает уравнение напряжений, записанное в соответствии со вторым законом Кирхгофа:

$$\underline{E}_0 + \underline{E}_{ad} + \underline{E}_{aq} + \underline{E}_\sigma = \underline{U} + I r.$$

Смысл первых трех величин, входящих в приведенное уравнение, пояснен в подразд. 11.3;  $E_\sigma$  — ЭДС, индуцированная потоком рассеяния якоря  $\Phi_\sigma$  (понятия потока рассеяния и ЭДС рассеяния рассматриваются в подразд. 5.1);  $r$  — активное сопротивление обмотки якоря.

Выразим из записанного уравнения вектор напряжения на выводах генератора

$$\underline{U} = \underline{E}_0 + \underline{E}_{ad} + \underline{E}_{aq} + \underline{E}_\sigma - I r.$$

Запишем ЭДС рассеяния аналогично выражению (5.5):

$$\underline{E}_\sigma = -j I x_\sigma,$$

где  $x_\sigma$  — индуктивное сопротивление рассеяния.

Данное выражение показывает отставание по фазе ЭДС рассеяния относительно тока статора (тока нагрузки) на  $90^\circ$ . (Аналогичным

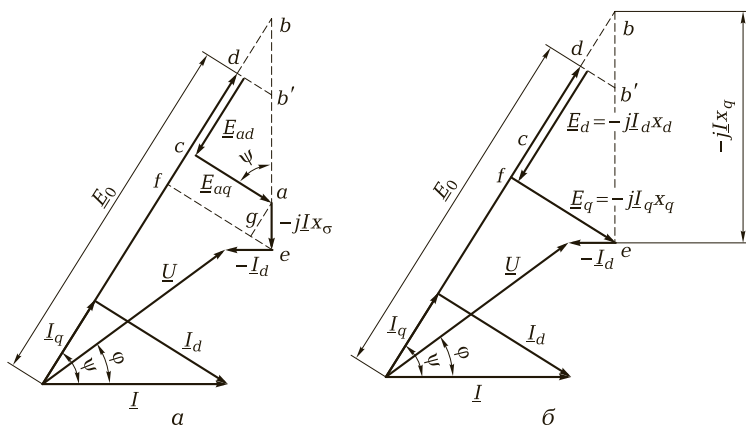


Рис. 11.11. Векторные диаграммы явнополюсного генератора: а — полная (основная); б — упрощенная (преобразованная)

образом, в соответствии с выражениями (11.9) и (11.11), можно было бы записать величины и  $\underline{E}_{aq}$  и  $\underline{E}_{ad}$ .)

Окончательно для вектора напряжения получим

$$\underline{U} = \underline{E}_0 + \underline{E}_{ad} + \underline{E}_{aq} - jI\dot{x}_\sigma - I\dot{r}. \quad (11.13)$$

Это уравнение аналогично уравнению (5.14), записанному для напряжения вторичной обмотки трансформатора (генератор уместно сравнивать именно со вторичной обмоткой трансформатора, потому что ЭДС, индуцированная в ней, играет роль ЭДС источника, в то время как в первичной цепи трансформатора ЭДС индукции  $E_1$  выступает как противоЭДС по отношению к напряжению сети). Можно также заметить, что уравнения (11.13) и (5.14) имеют смысл, общий для любого источника электроэнергии: напряжение на выходах источника отличается по своему значению от ЭДС источника на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника.

Векторная диаграмма (см. рис. 11.11, а) изображена для случая активно-индуктивной нагрузки (рис. 11.7 представляет практически ту же диаграмму в упрощенном виде). Вектор тока  $I$  выбран в качестве опорного вектора (от него измеряются все углы), и на рассматриваемой диаграмме, в отличие от рис. 11.7, этот вектор отложен горизонтально.

Поскольку при наличии в нагрузке индуктивного сопротивления продольная реакция якоря является размагничивающей (см. подразд. 11.3), вектор ЭДС  $\underline{E}_{ad}$ , индуцируемой продольным потоком реакции якоря, направлен противоположно вектору ЭДС  $\underline{E}_0$ , индуцируемой обмоткой возбуждения (как и на рис. 11.9, а). Вектор ЭДС  $\underline{E}_{aq}$ , индуцируемой поперечным потоком реакции якоря, повернут относительно вектора  $\underline{E}_0$  на  $90^\circ$  в сторону отставания, как на рис. 11.8, а. Множитель  $(-j)$  перед следующим компонентом уравнения (11.13) означает поворот на  $90^\circ$  в сторону отставания относительно вектора  $I$ . Наконец, знак минус перед произведением  $I\dot{r}$  означает направление на векторной диаграмме, противоположное направлению вектора  $I$ .

В случае *невянополюсного* генератора точки  $d$ ,  $b$  и  $b'$  на рис. 11.11, а совпадают, и прямоугольный треугольник  $acd$ , катеты которого имеют длины  $E_{aq}$  и  $E_{ad}$  (в масштабе, выбранном для ЭДС), подобен треугольнику с катетами  $I_q$  и  $I_d$  и гипотенузой  $I$  (в масштабе, выбранном для токов). Это утверждение следует из выражений (11.9) и (11.11) в случае равенства сопротивлений  $x_{aq}$  и  $x_{ad}$ .

**Синхронные индуктивные сопротивления.** Продолжая рассматривать векторную диаграмму явнополюсного генератора

(см. рис. 11.11, а), заметим, что углу  $\psi$  между вектором тока  $I$  и вектором ЭДС  $E_0$  равны углы  $bac$  и  $aeg$  (это следует из перпендикулярности вектора  $I$  отрезкам  $ba$  и  $ae$  и перпендикулярности вектора  $E_0$  отрезкам  $ac$  и  $eg$ ).

Рассмотрим отрезок  $ef = eg + gf$ . Из прямоугольного треугольника  $age$ , стороны которого измеряются в масштабе ЭДС и напряжений, имеем:  $eg = Ix_\sigma \cos\psi$ . Отрезок  $gf$ , равный отрезку  $ac$ , представляет модуль вектора  $E_{aq}$ . В таком случае

$$ef = Ix_\sigma \cos\psi + E_{aq} = I_q x_\sigma + I_q x_{aq} = I_q x_q = E_q. \quad (11.14)$$

Здесь учтены равенства (11.5) и (11.9) и введены обозначения

$$x_q = x_{aq} + x_\sigma \quad (11.15)$$

и  $E_q = I_q x_q$ . Величина  $x_q$ , включающая в себя индуктивное сопротивление реакции якоря по поперечной оси и индуктивное сопротивление рассеяния, называется *синхронным индуктивным сопротивлением по поперечной оси*.

Аналогичным образом рассмотрим отрезок  $fd = fc + cd$ . Отрезок  $fc$  равен отрезку  $ga$ . Из треугольника  $age$  имеем:  $ga = Ix_\sigma \sin\psi$ . Отрезок  $cd$  представляет модуль вектора  $E_{ad}$ . Итак,

$$fd = Ix_\sigma \sin\psi + E_{ad} = I_d x_\sigma + I_d x_{ad} = I_d x_d = E_d. \quad (11.16)$$

Здесь учтены равенства (11.3) и (11.11) и введены обозначения

$$x_d = x_{ad} + x_\sigma \quad (11.17)$$

и  $E_d = I_d x_d$ . Величина  $x_d$ , включающая в себя индуктивное сопротивление реакции якоря по продольной оси и индуктивное сопротивление рассеяния, называется *синхронным индуктивным сопротивлением по продольной оси*.

**Упрощенная (преобразованная) векторная диаграмма.** Для построения преобразованной векторной диаграммы необходимо знать значения величин  $r$ ,  $x_q$ ,  $x_d$ , которые легко определяются опытным путем (см. далее подразд. 11.6). Преобразованная диаграмма, показанная на рис. 11.11, б, получается из основной диаграммы с учетом равенств (11.14) и (11.16) и с учетом направлений соответствующих векторов. В частности, на диаграмме отображается отставание по фазе ЭДС  $E_d$  от тока  $I_d$  на  $90^\circ$ , чему соответствует векторное (комплексное) равенство  $E_d = -jI_d x_d$ .

Вместо уравнения (11.13) для преобразованной диаграммы получаем уравнение

$$\underline{U} = \underline{E}_0 + \underline{E}_d + \underline{E}_q - Ir, \text{ или } \underline{U} = \underline{E}_0 - jI_d x_d - jI_q x_q - Ir. \quad (11.18)$$

Заметим, что прямоугольный треугольник  $bfe$  подобен треугольнику с катетами  $I_d$  и  $I_q$  и гипотенузой  $I$ , и гипотенуза  $be$  треугольника

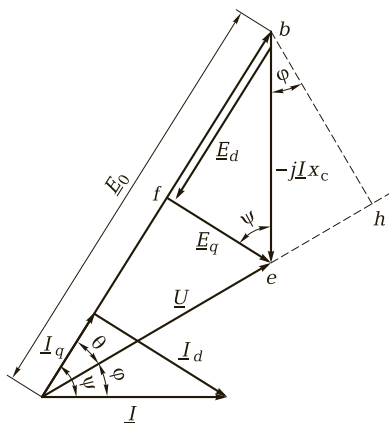


Рис. 11.12. Векторная диаграмма неявнополюсного генератора

$bfe$  равна  $Ix_q$ . Вершина  $b$  рассматриваемого треугольника не принадлежит векторной диаграмме явнополюсного генератора, однако сделанное замечание будет использовано далее.

**Векторная диаграмма неявнополюсного генератора.** В неявнополюсной машине индуктивные сопротивления, обусловленные поперечным и продольным потоками реакции якоря, равны между собой:  $x_{aq} = x_{ad}$ . Поэтому равны и синхронные индуктивные сопротивления по осям (см. выражения (11.15) и (11.17)):  $x_q = x_d$ . В таком случае

$$\frac{E_q}{E_d} = \frac{I_q x_q}{I_d x_d} = \frac{I_q}{I_d}$$

и, как отмечалось ранее, точки  $d$ ,  $b$  и  $b'$  на рис. 11.11 совпадают. Это отражается на векторной диаграмме неявнополюсного генератора, показанной на рис. 11.12. Диаграмма упрощена исключением вектора  $-Ir$ : падение напряжения на активном сопротивлении мощного генератора мало (дополнительное построение, выполненное штриховой линией, используется в подразд. 12.3).

Равенство синхронных индуктивных сопротивлений по осям позволяет использовать единое обозначение  $x_c$  для синхронного индуктивного сопротивления неявнополюсного генератора ( $x_c = x_q = x_d$ ), а также единое обозначение  $x_a$  для индуктивного сопротивления, обусловленного потоком реакции якоря ( $x_a = x_{aq} = x_{ad}$ ). Величины  $x_c$  и  $x_a$  связаны между собой выражением, аналогичным (11.15) и (11.17):

$$x_c = x_a + x_\sigma. \quad (11.19)$$



Векторная диаграмма неявнополюсного генератора (см. рис. 11.12) отвечает уравнению

$$\underline{U} = \underline{E}_0 - jI x_c, \quad (11.20)$$

где  $I x_c$  — падение напряжения на синхронном индуктивном сопротивлении. Катеты прямоугольного треугольника  $bfe$  соответствуют величинам  $E_d = I x_c \sin \psi$  и  $E_q = I x_c \cos \psi$ .

## 11.5. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Характеристики машины, которые всесторонне описывают ее рабочие свойства, получают при испытании машины. Для получения характеристик трехфазного генератора с его выводами соединяют регулируемую нагрузку различного характера (активную, индуктивную, емкостную), а обмотку возбуждения подключают к источнику постоянного напряжения и обеспечивают возможность регулирования тока возбуждения. Вал генератора приводят во вращение с номинальной частотой  $n_{\text{ном}}$  каким-либо первичным двигателем и поддерживают частоту вращения неизменной. Измеряют линейное напряжение на выводах генератора, ток нагрузки (линейный ток), а также ток возбуждения.

**Внешние характеристики.** Это зависимости напряжения  $U$  на зажимах генератора от тока нагрузки  $I$  при постоянных значениях частоты вращения и тока возбуждения. Внешние характеристики получают при активной нагрузке, т. е. при коэффициенте мощности нагрузки, равном единице ( $\cos \varphi = 1$ ), при индуктивной и емкостной нагрузках (в предельных случаях  $\cos \varphi = 0$ ).

При получении внешних характеристик исходным может быть номинальный режим или режим холостого хода. На рис. 11.13, *a* показаны внешние характеристики, при получении которых сначала устанавливался номинальный режим работы генератора: выбиралось такое сопротивление нагрузки, чтобы при номинальном токе возбуждения  $I_{\text{в.ном}}$  на выводах генератора устанавливалось номинальное напряжение  $U_{\text{ном}}$ , а по линейным проводам протекал номинальный ток  $I_{\text{ном}}$ . При разгрузке генератора (при увеличении сопротивления нагрузки) напряжение на выводах изменяется. Причины изменения напряжения отражаются уравнением (11.13). Главной причиной является изменение результирующего магнитного потока машины под влиянием реакции якоря. Другие причины: падение напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния и падение напряжения

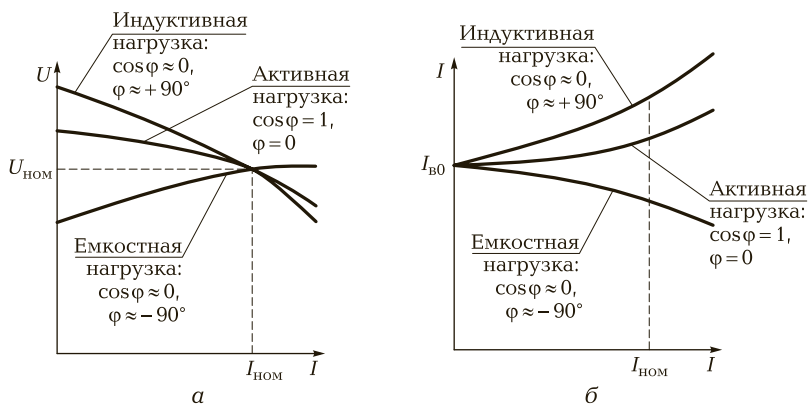


Рис. 11.13. Характеристики синхронного генератора:  
 а — внешние, полученные методом понижения нагрузки; б — регулировочные

на активном сопротивлении обмотки якоря (изменение результирующего магнитного потока и падение напряжения на активном сопротивлении рассматривались также при обсуждении нагрузочной и внешней характеристик генератора постоянного тока независимого возбуждения (см. подразд. 2.3)).

Чем меньше ток нагрузки, тем меньше падение напряжения на активном сопротивлении якоря. Наличие активного сопротивления якоря приводит к увеличению напряжения по мере разгрузки генератора, как и в генераторе постоянного тока.

Что касается реакции якоря, то ее действие зависит от характера нагрузки. При *индуктивной нагрузке* реакция якоря является продольно-размагничивающей (см. подразд. 11.3). При разгрузке реакция якоря уменьшается и напряжение на выводах генератора увеличивается. Таким образом, при индуктивной нагрузке реакция якоря и активное сопротивление якоря действуют на изменение напряжения в одном направлении. При *емкостной нагрузке* реакция якоря носит продольно-намагничивающий характер (см. подразд. 11.3) и при уменьшении тока нагрузки напряжение на выводах генератора уменьшается. При *активной нагрузке* уменьшение тока сопровождается чаще всего увеличением напряжения, поскольку при этом ослабляется реакция якоря по поперечной оси (возможные случаи изменения результирующей ЭДС при активной нагрузке упомянуты в подразд. 11.3).

Влияние падения напряжения на индуктивном сопротивлении потока рассеяния может формально рассматриваться совместно

с действием реакции якоря, принимая во внимание введенные величины синхронных индуктивных сопротивлений  $x_q$  и  $x_d$  (см. выражения (11.15) и (11.17)). При этом вместо ЭДС  $E_{aq}$  и  $E_{ad}$ , индуцированных соответственно поперечным и продольным потоками реакции якоря, рассматриваются ЭДС  $E_q$  и  $E_d$ , определяемые выражениями (11.14) и (11.16), и вместо уравнения напряжений (11.13) рассматривается уравнение (11.18).

По внешним характеристикам определяют процентное изменение напряжения:

$$\Delta U = \frac{E_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100, \quad (11.21)$$

где  $E_0$  — ЭДС генератора в режиме холостого хода, равное напряжению на его выводах в этом режиме.

Внешние характеристики являются основными эксплуатационными характеристиками генератора.

**Регулировочные характеристики.** Представляют зависимости тока возбуждения генератора  $I_b$  от тока нагрузки  $I$  при постоянных значениях напряжения на выводах генератора и частоты вращения. Как и внешние, регулировочные характеристики получают для различных видов нагрузки (для различных коэффициентов мощности нагрузки). Эти характеристики показывают, каким образом нужно изменять ток возбуждения, чтобы напряжение  $U$  на выводах генератора оставалось неизменным (в частности, равным номинальному значению  $U_{\text{ном}}$ ). Их используют для выбора и проектирования регулирующей аппаратуры.

Регулировочные характеристики для разных видов нагрузки показаны на рис. 11.13, б. При индуктивной нагрузке уменьшение напряжения на выводах нерегулируемого генератора, происходящее при увеличении тока нагрузки, наиболее велико. Поэтому для поддержания неизменного напряжения требуется и наибольшее изменение тока возбуждения, поскольку ток возбуждения определяет основной магнитный поток и, значит, индуцируемую ЭДС (см. выражения (9.13)). При индуктивной и активной нагрузках с ростом тока нагрузки необходимо увеличивать ток возбуждения, а при емкостной нагрузке — уменьшать, чтобы скомпенсировать намагничивающую реакцию якоря.

Символом  $I_{b0}$  на рис. 11.13, б обозначен ток возбуждения, при котором напряжение в режиме холостого хода равно номинальному ( $E_0 = U_{\text{ном}}$ ).

По регулировочным характеристикам определяют процентное изменение тока возбуждения, соответствующее неизменному зна-

чению напряжения при изменении тока нагрузки от нуля до номинального значения:

$$\Delta I_B = \frac{I_{B, \text{НОМ}} - I_{B0}}{I_{B0}} 100. \quad (11.22)$$

**Характеристика холостого хода (ХХХ).** Представляет зависимость индуцированной в обмотке статора ЭДС  $E_0$  от тока возбуждения  $I_B$  при разомкнутой внешней цепи генератора ( $I = 0$ ) и постоянной частоте вращения ротора. Эта характеристика позволяет оценить насыщение магнитной цепи машины; с ее помощью могут быть построены векторные диаграммы и другие характеристики машины. Вид характеристики холостого хода показан на рис. 11.14 вместе с двумя другими характеристиками, которые будут рассматриваться далее.

По осям ХХХ, вместо величин  $E_0$  и  $I_B$ , часто откладывают относительные величины  $E_0^* = E_0/U_{\text{НОМ}}$  и  $I_0^* = I_B/I_{B, \text{НОМ}}$ . Характеристики холостого хода различных генераторов, построенные в относительных величинах, незначительно отличаются друг от друга. Усредненная ХХХ, полученная на основании обобщения опытных данных по генераторам средней и большой мощности, называется *нормальной ХХХ*. Характеристика вновь построенного генератора должна быть близка к нормальной. Значительное различие экспериментальной и нормальной характеристик указывает на то, что генератор рассчитан неправильно. В частности, несовпадение прямолинейных частей экспериментальной и нормальной характеристик говорит о неправильном выборе воздушного зазора.

Характеристики холостого хода синхронного генератора и генератора постоянного тока подобны.

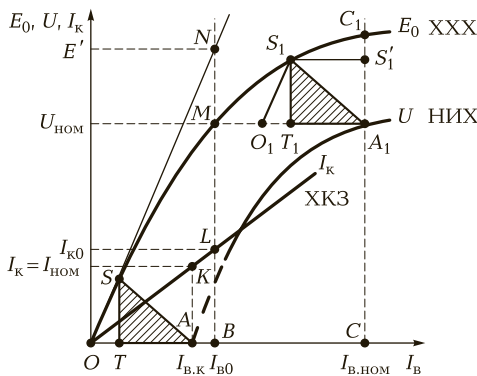


Рис. 11.14. Характеристики синхронного генератора (холостого хода, нагрузочная и трехфазного короткого замыкания) и реактивный (характеристический) треугольник

Нормальная характеристика синхронного генератора проходит через начало координат, аналогично расчетной характеристике 3 на рис. 2.3.

Характеристика, полученная опытным путем при снижении тока возбуждения аналогична характеристике 2 на рис. 2.3. Она пересекает ось  $E_0$  в точке  $E_{ост}$ , соответствующей остаточной ЭДС, примерно равной 2... 3 % от номинального напряжения  $U_{ном}$ . ЭДС  $E_{ост}$  создается остаточным магнитным полем машины.

**Нагрузочные характеристики.** Показывают зависимости напряжения на зажимах генератора  $U$  от тока возбуждения  $I_v$  при постоянном токе нагрузки (в частности, при номинальном токе) и постоянной частоте вращения. Нагрузочные характеристики, построенные при различных характерах нагрузки, в большей или в меньшей степени не совпадают с характеристикой холостого хода, поскольку значение ЭДС генератора при данном токе возбуждения не совпадает со значениями напряжения на его выводах. Для анализа свойств генератора особое значение имеет нагрузочная индуктивная (индукционная) характеристика (НИХ, см. рис. 11.14), построенная при индуктивной нагрузке ( $\cos\varphi = 0$ ,  $\varphi = +90^\circ$ ). Точка  $A_1$  характеристики соответствует номинальному току нагрузки  $I_{ном}$  и номинальному напряжению  $U_{ном}$  на выводах генератора. Ток возбуждения, при котором достигаются эти параметры, есть номинальный ток возбуждения  $I_{в.ном}$ . Каждую точку НИХ, расположенную левее точки  $A_1$ , получают в два этапа:

- 1) уменьшают ток возбуждения; при этом уменьшается ЭДС генератора и ток нагрузки;
- 2) уменьшают сопротивление нагрузки, так чтобы при новом значении тока возбуждения ток нагрузки принял первоначальное значение  $I_{ном}$ .

Итак, каждую точку нагрузочной характеристики, расположенную левее предыдущей, получают при меньшем сопротивлении нагрузки.

Часть НИХ, получаемая опытным путем, показана на рис. 11.14 сплошной линией.

Крайняя точка А характеристики, находящаяся на горизонтальной оси координатной плоскости, соответствует нулевому значению напряжения на выводах генератора и нулевому значению сопротивления нагрузки, т. е. режиму короткого замыкания. Таким образом, ток  $I_{в.к}$  — это ток возбуждения, при котором ток короткого замыкания генератора равен номинальному току  $I_{ном}$ . Точку А пересечения нагрузочной характеристики с горизонтальной осью находят из характеристики короткого замыкания.

Нагрузочные характеристики, построенные для номинального тока нагрузки, но при других характерах нагрузки, также проходят через точку А. Действительно, режим короткого замыкания означает равенство нулю всех сопротивлений нагрузки — активного, индуктивного и емкостного.

Остальные точки нагрузочной характеристики *при активной нагрузке* находятся выше, чем НИХ, поскольку поперечная реакция якоря в меньшей степени размагничивает машину, чем продольная размагничивающая (см. подразд. 11.3). Нагрузочная характеристика при емкостной нагрузке проходит еще выше, причем при некотором значении тока возбуждения она пересекает характеристику холостого хода, и далее располагается выше ее, что объясняется продольной намагничивающей реакцией якоря, при которой напряжение на выводах генератора выше ЭДС.

**Характеристика трехфазного короткого замыкания (ХКЗ, рис. 11.14).** Представляет зависимость тока якоря генератора от тока возбуждения при замкнутых накоротко выводах обмотки якоря С1, С2, С3 и неизменной частоте вращения. Ток якоря при этом является током короткого замыкания  $I_k$ .

Поскольку активное сопротивление обмотки якоря малó по сравнению с индуктивным, то можно считать, что ток короткого замыкания отстает от ЭДС на  $90^\circ$  и создает продольную размагничивающую реакцию якоря. Из-за большой размагничивающей реакции якоря магнитная цепь машины оказывается *ненасыщенной*, и ХКЗ представляет собой *прямую линию*. Как уже отмечалось, символом  $I_{в.к}$  обозначен ток возбуждения, при котором ток короткого замыкания  $I_k$  равен номинальному току  $I_{ном}$ .

Помимо трехфазного, различают двухфазное и однофазное короткое замыкание. При двухфазном замыкании электрически соединены между собой два вывода генератора (С1 и С2, С2 и С3 или С3 и С1). При однофазном коротком замыкании замкнута одна из фаз обмотки статора. При одном и том же токе возбуждения ток якоря при трехфазном КЗ будет наименьшим, а при однофазном — наибольшим. Это объясняется тем, что размагничивающее действие реакции якоря создается токами *прямой последовательности*, а при трехфазном КЗ в обмотке якоря протекают только эти токи. В режиме однофазного КЗ ток *обратной последовательности* имеет наибольшее значение, а размагничивающее действие реакции якоря оказывается наименьшей (разложение несимметричной трехфазной системы токов на симметричные составляющие — токи прямой, обратной и нулевой последовательностей — изучается в теоретической электротехнике).

## 11.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

**Общие замечания.** Важными параметрами генератора, в значительной степени определяющими его рабочие свойства, являются синхронное индуктивное сопротивление, индуктивное сопротивление рассеяния, а также отношение короткого замыкания. Для нахождения этих параметров пользуются характеристикой холостого хода, нагрузочной индуктивной характеристикой, построенной для номинального тока, и характеристикой трехфазного короткого замыкания (см. рис. 11.14). Прежде всего рассмотрим векторные диаграммы генератора при индуктивной нагрузке и при коротком замыкании, которые позволят пояснить методику определения параметров.

Векторная диаграмма синхронного генератора при индуктивной нагрузке (рис. 11.15, а) является частным случаем полной векторной диаграммы (см. рис. 11.11, а). Реакция якоря при индуктивной нагрузке является продольной размагничивающей, и поток якоря индуцирует ЭДС  $E_{ad}$ , направленную против ЭДС  $E_0$ , индуцированной потоком полюсов. Согласно выражению (11.11)  $E_{ad} = -jI_d x_{ad}$ . В данном случае весь ток якоря является продольным током:  $I_d = I$ . Вектор ЭДС, индуцированной потоком рассеяния ( $E_\sigma = -jI x_\sigma$ ), перпендикулярен вектору тока  $I$  и сонаправлен с вектором  $E_{ad}$ .

Напряжение на выводах генератора определяется уравнением (11.13). Пренебрежем в этом уравнении падением напряжения на активном сопротивлении  $Ir$  и исключим ЭДС  $E_{aq}$ , индуцированную поперечным потоком якоря, которая отсутствует при индуктивной нагрузке. Получим

$$\underline{U} = \underline{E}_0 - jI x_{ad} - jI x_\sigma, \quad (11.23)$$

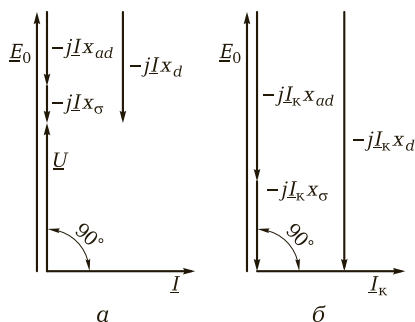


Рис. 11.15. Векторные диаграммы синхронного генератора:

а — при индуктивной нагрузке; б — при коротком замыкании

где вместо ЭДС  $E_{ad}$  записано ее выражение через ток и индуктивное сопротивление, обусловленное продольной реакцией якоря.

Уравнению (11.23) отвечает векторная диаграмма (см. рис. 11.15, а), на которой также показан вектор  $\underline{E}_d = -jI_k x_d$ , где  $x_d$  — синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси (см. выражение (11.17)).

При коротком замыкании генератора напряжение на его выводах равно нулю, а ток является практически чисто индуктивным. Запишем для этого случая уравнение ЭДС, используя уравнение (11.23):

$$\underline{E}_0 - jI_k x_{ad} - jI_k x_\sigma = \underline{E}_0 - jI_k x_d = 0. \quad (11.24)$$

Векторная диаграмма при коротком замыкании показана на рис. 11.15, б.

**Определение ненасыщенного значения синхронного индуктивного сопротивления по продольной оси.** Из уравнения  $\underline{E}_0 - jI_k x_d = 0$  (11.24) справедливого при коротком замыкании генератора, следует равенство модулей векторов:  $E_0 = I_k x_d$  (см. рис. 11.15, б). Значение синхронного индуктивного сопротивления  $x_d$  не является постоянным; оно зависит от степени насыщения магнитной цепи генератора. В режиме короткого замыкания магнитная цепь не насыщена; в этом случае говорят о *ненасыщенном значении синхронного индуктивного сопротивления по продольной оси*  $x_d^{\text{нн}}$ . Таким образом,

$$x_d^{\text{нн}} = \frac{E_0}{I_k}, \quad (11.25)$$

где  $E_0$  — ЭДС генератора, индуцированная потоком обмотки возбуждения при малом токе возбуждения  $I_b$ , соответствующем *начальному прямолинейному участку XXX* (этот участок характеристики соответствует *ненасыщенной* магнитной цепи машины).

На практике для определения  $x_d^{\text{нн}}$  используют не малое значение  $I_b$ , а, например, значение тока возбуждения  $I_{b0}$ , при котором напряжение в *режиме холостого хода* равно номинальному ( $E_0 = U_{\text{ном}}$ ). Однако при этом в числителе формулы (11.25) нужно записать не значение  $E_0 = U_{\text{ном}}$ , а значение  $E'$ , определяемое как ордината точки пересечения двух прямых: прямой *ON*, являющейся продолжением *начального участка XXX*, и вертикали *BN*, исходящей из точки горизонтальной оси с абсциссой  $I_{b0}$  (см. рис. 11.14). Ток трехфазного короткого замыкания, соответствующий току возбуждения  $I_{b0}$ , обозначен  $I_{k0}$  и определяется отрезком *BL*. Каждая из величин — ток возбуждения, ЭДС и ток короткого замыкания — измеряется по характеристикам *в своем собственном масштабе*.

Итак, ненасыщенное значение синхронного индуктивного сопротивления определяется по *спрямленной XXX* и по *ХКЗ* следующим образом:



$$x_d^{\text{HH}} = \frac{E'}{I_{\text{к0}}} = \frac{BN}{BL}. \quad (11.26)$$

**Определение насыщенного значения синхронного индуктивного сопротивления по продольной оси.** При увеличении тока возбуждения увеличивается насыщение магнитной цепи генератора, а значение синхронного индуктивного сопротивления  $x_d$  уменьшается. При индуктивной нагрузке согласно уравнению (11.23)  $\underline{U} = \underline{E}_0 - jI x_d$ , так как  $x_d = x_{ad} + x_\sigma$ . Поскольку все векторы, входящие в данное уравнение, располагаются вдоль одной прямой (см. рис. 11.15, а), имеем арифметическое равенство  $U = E_0 - I x_d$ , откуда получаем

$$x_d = \frac{E_0 - U}{I}. \quad (11.27)$$

Значение  $x_d$ , найденное с учетом насыщения магнитной системы машины, называют *насыщенным значением* синхронного индуктивного сопротивления.

Для тока возбуждения  $I_{\text{в,ном}}$  при котором напряжение генератора при индуктивной нагрузке равно номинальному  $U_{\text{ном}}$ , насыщенное значение синхронного индуктивного сопротивления равно

$$x_d = \frac{E_0 - U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}} = \frac{A_1 C_1}{I_{\text{ном}}}, \quad (11.28)$$

где  $A_1 C_1$  — длина отрезка между ХХХ и НИХ, измеряемая в масштабе ЭДС и напряжения (см. рис. 11.14);  $I_{\text{ном}}$  — номинальный ток статора, для которого была получена нагрузочная характеристика.

**Определение отношения короткого замыкания.** Отношение короткого замыкания (ОКЗ) — расчетная величина, дающая возможность судить о ряде свойств генератора, например об устойчивости его работы параллельно с сетью. По определению ОКЗ выражается следующим образом:

$$\text{ОКЗ} = \frac{I_{\text{к0}}}{I_{\text{ном}}}, \quad (11.29)$$

где  $I_{\text{к0}}$  — ток трехфазного короткого замыкания при токе возбуждения  $I_{\text{в0}}$  (как указано ранее,  $I_{\text{в0}}$  — ток возбуждения, при котором напряжение при холостом ходе равно номинальному:  $E_0 = U_{\text{ном}}$ ).

Поскольку характеристика короткого замыкания представляет собой прямую линию (график прямой пропорциональности), ОКЗ может быть вычислено как отношение соответствующих значений тока возбуждения, так как соответствующие катеты подобных прямоугольных треугольников  $OBL$  и  $OAK$  пропорциональны (см. рис. 11.14):

$$\text{ОКЗ} = \frac{I_{\text{в0}}}{I_{\text{вк}}} = \frac{OB}{OA}, \quad (11.30)$$

где  $I_{\text{вк}}$  — ток возбуждения, при котором ток короткого замыкания  $I_{\text{к}}$  равен номинальному току  $I_{\text{ном}}$ .

Синхронные машины с малым ОКЗ характеризуются большим изменением напряжения при колебаниях нагрузки и являются менее устойчивыми при параллельной работе.

ОКЗ синхронных неявнополюсных машин (например, турбогенераторов) составляет 0,5...0,7 (т.е. у них  $I_{\text{к0}}$  меньше, чем  $I_{\text{ном}}$ , и соответственно  $I_{\text{в0}}$  меньше, чем  $I_{\text{вк}}$ ). ОКЗ мощных синхронных явнополюсных машин обычно находится в пределах 1,0...1,4. Значение этого параметра у явнополюсных машин средней и малой мощности составляет 2,0 и более.

**Определение индуктивного сопротивления рассеяния.** Индуктивное сопротивление  $x_{\sigma}$  выполняется следующим образом:

- влево от точки  $A_1$ , соответствующей номинальному напряжению на НИХ (см. рис. 11.14), откладывают отрезок  $A_1O_1$ , равный току возбуждения  $I_{\text{в.к}}$  в соответствующем масштабе:  $A_1O_1 = I_{\text{в.к}} = AO$ ;
- через точку  $O_1$  проводят прямую, параллельную начальному прямолинейному участку XXX, до пересечения с XXX в точке  $S_1$ ;
- из точки  $S_1$  проводят перпендикуляр  $S_1T_1$  к прямой  $A_1O_1$ . Можно показать, что длина перпендикуляра  $S_1T_1$  представляет (в масштабе напряжения) падение напряжения в индуктивном сопротивлении рассеяния:  $S_1T_1 = I_{\text{ном}}x_{\sigma}$ . Тогда

$$x_{\sigma} = \frac{S_1T_1}{I_{\text{ном}}}. \quad (11.31)$$

Смысл построений, выполняемых при определении значения  $x_{\sigma}$ , поясняется в следующем подразделе.

**Характеристический треугольник.** Треугольник  $S_1T_1A_1$ , построенный в процессе определения значения  $x_{\sigma}$ , называется *характеристическим треугольником* синхронного генератора (на рис. 11.14 он заштрихован). Катет  $T_1A_1$  этого треугольника пропорционален МДС, созданной током якоря, т.е. характеризует реакцию якоря: если бы реакция якоря отсутствовала, то для получения на зажимах генератора напряжения  $U_{\text{ном}}$  был бы необходим ток возбуждения  $I'_{\text{в.ном}} = OC - T_1A_1$  вместо  $I_{\text{в.ном}} = OC$  (ср. с рассуждениями, приведенными в подразд. 2.3 в отношении характеристического треугольника генератора постоянного тока). Реакция якоря характеризуется, кро-

ме того, вертикальным отрезком  $C_1 S'_1$ , который определяет падение напряжение на индуктивном сопротивлении  $x_{ad}$ , обусловленном продольным потоком реакции якоря:  $I_{\text{ном}} x_{ad} = C_1 A_1 - S'_1 A_1 = C_1 S'_1$  (см. соответствующие отрезки также на векторной диаграмме, рис. 11.15, а)

Влияние потока рассеяния, как было сказано ранее, определяется катетом  $S_1 T_1$  характеристического треугольника. На горизонтальной оси тот же фактор учитывается отрезком  $O_1 T_1$ , который пропорционален МДС, связанной с потоком рассеяния.

Нагрузочная характеристика получена при неизменном токе якоря, откуда можно сделать вывод, что характеристические треугольники, построенные для различных точек НИХ, равны между собой. Это означает, что если характеристический треугольник, построенный для данного тока возбуждения, перемещать параллельно самому себе так, чтобы его вершина  $S_1$  скользила по характеристике холостого хода, то вершина  $A_1$  опишет нагрузочную индуктивную характеристику (отметим, что НИХ, построенная таким способом, несколько отличается от полученной экспериментально.) Характеристический треугольник  $STA$ , горизонтальный катет которого лежит на оси  $I_{\text{в}}$ , имеет вершину  $S$  на прямолинейном участке характеристики холостого хода.

Подытожим изложенное ранее. При разных токах возбуждения характеристический треугольник занимает различные положения на координатной плоскости ХХХ и НИХ. При этом длины отрезков  $OT$  и  $ST$ , определяющих влияние потока рассеяния, остаются неизменными. Неизменной остается также длина отрезка  $TA$ , характеризующая реакцию якоря (пропорциональная МДС якоря). Однако из-за криволинейности характеристик, связанной с увеличением магнитного насыщения при увеличении тока возбуждения, не остается неизменной длина вертикального отрезка, определяющая падение напряжения  $I x_{ad}$  на индуктивном сопротивлении, обусловленном реакцией якоря (при токе возбуждения  $I_{\text{в,ном}}$  длина этого отрезка равна  $C_1 S'_1$ ). Чем больше ток возбуждения, тем меньше значение  $I x_{ad}$ , что согласуется с изложенным об уменьшении синхронного индуктивного сопротивления  $x_d$  при увеличении тока возбуждения (сопротивление  $x_d$  изменяется за счет изменения сопротивления  $x_{ad}$  при постоянстве значения  $x_{\sigma}$ ).

## 11.7. ВОЗБУЖДЕНИЕ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

**Общее представление о системах возбуждения.** Обмотки роторов (обмотки возбуждения) синхронных генераторов получают питание

от источников постоянного напряжения, называемых *возбудителями*. Мощность возбудителя составляет 0,3...3 % от мощности, вырабатываемой генератором. Напряжение цепи возбуждения мощных генераторов не превышает 650 В. Регулируя ток возбуждения, изменяют ЭДС синхронного генератора. Совокупность возбудителя, вспомогательных и регулирующих устройств называется *системой возбуждения*.

Системы возбуждения подразделяются на две группы: с и с т е м ы н е з а в и с и м о г о в о з б у ж д е н и я, в которых используются источники постоянного напряжения либо источники переменного напряжения с выпрямительными устройствами, и с и с т е м ы с а м о в о з б у ж д е н и я, получающие питание от выводов основного синхронного генератора через понижающие трансформаторы и выпрямительные устройства. Особое положение занимают генераторы малой мощности с п о с т о я н н ы м и м а г н и т а м и, в которых ротор не имеет обмотки, а является постоянным магнитом. Такие машины условно относят к генераторам с самовозбуждением, поскольку они не нуждаются в постороннем источнике энергии.

Синхронные генераторы, установленные на электростанциях, включены на параллельную работу. Особенности параллельной работы рассматриваются в гл. 12. Здесь отметим, что регулирование возбуждения генераторов позволяет повысить устойчивость их параллельной работы. В частности, при глубоких снижениях напряжения в сети, которые имеют место при коротких замыканиях, для сохранения устойчивости параллельной работы применяется *форсировка возбуждения*, т. е. быстрое увеличение напряжения возбуждения до потолочного (максимального) значения. Важнейшими параметрами систем возбуждения являются *кратность форсировки*, т. е. отношение потолочного напряжения возбуждения  $U_{в.пот}$  к номинальному  $U_{в.ном}$ , и *быстродействие*, определяемое скоростью нарастания напряжения возбуждения. Турбогенераторы должны иметь кратность форсировки не менее 2, а гидрогенераторы — не менее 1,8. Скорость нарастания напряжения возбуждения турбогенераторов и гидрогенераторов должна составлять не менее  $1,3U_{в.ном}$  в секунду. Мощные гидрогенераторы, работающие на дальние электропередачи, должны иметь кратность форсировки 3...4 и скорость нарастания возбуждения до  $10U_{в.ном}$  в секунду.

**Независимое электромашинное возбуждение синхронных генераторов (рис. 11.16, а).** Обладает рядом недостатков, но продолжает применяться до настоящего времени для генераторов мощностью до 100 МВт. В качестве возбудителя в этой системе возбуждения используется генератор постоянного тока, вал которого соединен

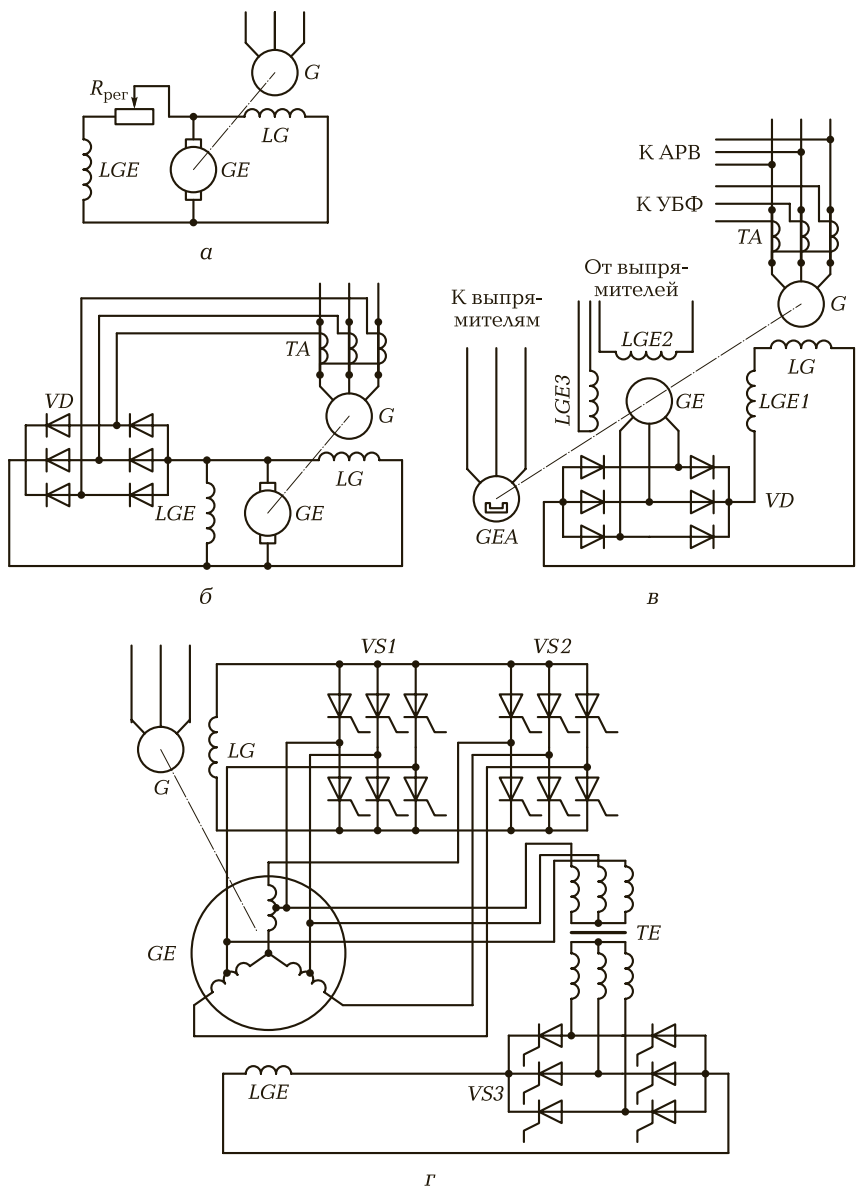


Рис. 11.16. Упрощенные схемы независимого возбуждения:

а — электромашинного от генератора постоянного тока; б — то же с компаундированием; в — высокочастотного с применением вспомогательного индукторного генератора; г — тиристорного

с валом синхронного генератора (как говорят в этом случае, генераторы находятся на одном валу). Буквой  $G$  на схеме обозначен синхронный генератор. Из схемы видно, что обмотка возбуждения  $LG$  синхронного генератора является нагрузкой возбудителя  $GE$  (буква  $E$  в этом обозначении означает excitation — возбуждение генератора). Возбудитель  $GE$  имеет параллельное возбуждение; его обмотка возбуждения обозначена  $LGE$ . Рис. 11.16, *a* представляет простейшую схему электромашинного возбуждения, в которой регулирование напряжения возбуждения генератора осуществляется регулировочным реостатом  $R_{рег}$  в цепи возбуждения возбудителя. Форсировка возбуждения осуществляется шунтированием резистора  $R_{рег}$ , т. е. замыканием его выводов нулевым сопротивлением (цепь шунтирования на схеме не показана).

Для автоматического поддержания напряжения генератора на постоянном уровне система возбуждения дополняется а в т о м а т и ч е с к и м р е г у л я т о р о м в о з б у ж д е н и я, который влияет на ток возбуждения в зависимости от напряжения на выводах генератора (автоматические регуляторы возбуждения рассматриваются в курсе автоматики энергосистем).

**Компаундирование возбуждения** (рис. 11.16, *б*). Для повышения устойчивости работы синхронного генератора и обеспечения автоматического регулирования ЭДС применяют *компаундирование возбуждения*. (Для случая генераторов постоянного тока компаундное, или смешанное, возбуждение рассмотрено в подразд. 2.5.) При компаундировании возбуждения синхронного генератора магнитный поток регулируется автоматически в зависимости от тока якоря генератора. Цепь компаундирования включает в себя трансформаторы тока  $TA$  и трехфазный диодный выпрямитель  $VD$ . При изменении тока в якоре синхронного генератора изменяется ток в обмотке возбуждения  $LGE$  электромашинного возбудителя  $GE$ , вследствие чего изменяется напряжение возбудителя и ток в обмотке возбуждения синхронного генератора  $G$ .

Заметим, что компаундирование возбуждения реагирует на изменение тока генератора, но не реагирует на изменение напряжения и коэффициента мощности  $\cos\varphi$ . Поэтому оно не может поддерживать напряжение на шинах генератора, если оно изменяется, а ток при этом остается неизменным. При изменении коэффициента мощности напряжение может существенно отклоняться от нормального уровня. По этой причине цепь компаундирования, как правило, дополняется а в т о м а т и ч е с к и м к о р р е к т о р о м н а п р я ж е н и я, выполненным, например, на основе магнитного усилителя.

Одним из недостатков систем возбуждения с электромашинным возбудителем является невысокая скорость нарастания тока возбуждения в случае глубокого снижения напряжения в сети.

Другой недостаток касается турбогенераторов, имеющих высокую частоту вращения. Он состоит в малой надежности электромашинного возбудителя из-за вибрации и тяжелых условий работы щеток и коллектора. У мощных генераторов (свыше 150 МВт) мощность возбуждения становится настолько значительной, что оказывается затруднительным выполнить надежный возбудитель — генератор постоянного тока с частотой вращения 3000 об/мин. Одним из решений задачи повышения надежности работы возбудителя является снижение его частоты вращения с помощью механического редуктора, однако наличие дополнительной механической передачи также является недостатком системы возбуждения.

**Система независимого возбуждения с применением вспомогательного индукторного генератора** (рис. 11.16, в). Более совершенная система возбуждения основана на применении в качестве вспомогательной машины высокочастотного индукторного синхронного генератора.

**Примечание.** Индукторный генератор — это электрическая машина переменного тока, у которой отсутствует обмотка на роторе и, таким образом, нет скользящих контактов. Трехфазная обмотка якоря и обмотка возбуждения помещаются на статоре. Ферромагнитный ротор выполнен зубчатым. При вращении такого ротора происходит изменение магнитного потока обмотки возбуждения, необходимое для получения переменной ЭДС. Отсутствие скользящих контактов позволяет выполнить такую машину высокочастотной.

Вал индукторного генератора  $GE$ , играющего роль возбудителя основного синхронного генератора  $G$ , соединен с валом последнего. Индукторный генератор вырабатывает напряжение частотой 500 Гц при частоте вращения 3000 об/мин. Высокая частота напряжения вспомогательного генератора повышает быстродействие системы возбуждения.

На статоре генератора  $GE$  помещают три обмотки возбуждения. Одна из них ( $LGE1$ ) соединяется последовательно с диодным выпрямителем  $VD$  и с обмоткой возбуждения  $LG$  основного синхронного генератора. При коротком замыкании в энергосистеме последовательное соединение обмоток возбуждения приводит к резкому увеличению тока возбуждения вспомогательного и основного генераторов вследствие броска тока в роторе.

Две другие обмотки возбуждения индукторного генератора (*LGE2* и *LGE3*) получают питание от подвозбудителя *GEA* через выпрямители. *Подвозбудитель* — это генератор, являющийся возбудителем для возбудителя *GE* основного генератора *G* (в обозначении *GEA* буква *A* означает additional — дополнительный). В рассматриваемой системе возбуждения *GEA* — это генератор, ротор которого представляет собой постоянный магнит, и в котором, таким образом, отсутствуют скользящие контакты, как и в индукторном генераторе. Частота напряжения этого подвозбудителя равна 400 Гц.

Ток возбуждения обмотки *LGE2* регулируется автоматическим регулятором возбуждения (АРВ), а ток возбуждения обмотки *LGE3* регулируется устройством бесконтактной форсировки возбуждения (УБФ).

Напряжение, управляющее устройством АРВ, пропорционально напряжению на выводах основного генератора *G* (между генератором и АРВ включен трансформатор напряжения, не показанный на схеме). АРВ обеспечивает поддержание напряжения генератора при нормальном режиме его работы.

Ток, управляющий устройством УБФ, пропорционален току якоря генератора (ток поступает на УБФ через трансформаторы тока *TA*). УБФ обеспечивает начальное возбуждение генератора, а также форсировку возбуждения при снижении напряжения более чем на 5 %.

При использовании высокочастотной системы возбуждения со вспомогательным индукторным генератором достигается кратность форсировки возбуждения, равная двум, и скорость нарастания напряжения возбуждения  $2U_{в.ном}$  в секунду.

**Система независимого тиристорного возбуждения (рис. 11.16, г).** Обладает наибольшим быстродействием и позволяет получить кратность форсировки возбуждения более двух. На одном валу с основным синхронным генератором *G* находится вспомогательный синхронный генератор *GE*. Из приведенной схемы видно, что в трехфазной обмотке статора вспомогательного генератора имеются отпайки, которые позволяют использовать напряжение *части обмотки*. В цепи статора генератора *GE* имеются две группы тиристоров: рабочая группа *VS1* и форсировочная *VS2*. На стороне переменного тока (т. е. на стороне обмотки статора вспомогательного генератора) рабочая группа тиристоров включена на неполное напряжение, а форсировочная группа — на полное. На стороне постоянного тока две группы тиристоров соединены параллельно и подключены к обмотке возбуждения основного генератора.

При нормальном режиме работы генератора на управляющие электроды тиристоров рабочей группы *VS1* подается потенциал, от-



крывающий тиристоры, и по обмотке  $LG$  течет ток возбуждения (цепи управления тиристорами на схеме не показаны). Форсировочная группа тиристоров при этом практически закрыта.

В режиме форсировки возбуждения тиристоры группы  $VS2$ , питающиеся от полного напряжения вспомогательного генератора, открываются полностью и дают ток форсировки. Рабочая группа тиристоров при этом запирается более высоким напряжением форсировочной группы.

Вспомогательный генератор  $GE$  является генератором с самовозбуждением. Обмотка возбуждения  $LGE$  получает питание от части обмотки статора этого же генератора через понижающий трансформатор  $TE$  и выпрямительную тиристорную группу  $VS3$ .

**Система бесщеточного возбуждения.** При токах возбуждения более 3 кА скользящие контакты между щетками и кольцами, через которые ток поступает на вращающуюся обмотку возбуждения генератора, становятся ненадежными. Этот недостаток может быть преодолен использованием бесщеточного возбуждения. У вспомогательного синхронного генератора, питающего обмотку возбуждения основного генератора, обмотка переменного тока (якорная обмотка) находится *на роторе*, а не на статоре. Вспомогательный генератор находится на одном валу с основным. От якорной обмотки ротора вспомогательного генератора ток поступает через полупроводниковый выпрямитель на обмотку ротора основного генератора, являющуюся его обмоткой возбуждения. Выпрямитель вращается вместе с роторами генераторов, так что скользящие контакты в этой цепи отсутствуют. Ток возбуждения вспомогательного генератора поступает на его обмотку возбуждения, расположенную на статоре, от подвозбудителя. Регулирование тока возбуждения основного генератора производится изменением тока возбуждения вспомогательного генератора.

### **Система полупроводникового самовозбуждения (рис. 11.17).**

Системы самовозбуждения менее надежны, чем системы независимого возбуждения, поскольку их работа зависит от режима сети. Самовозбуждение осуществляется за счет остаточного магнитного потока (процесс самовозбуждения генератора постоянного тока описан в подразд. 2.4). В системе полупроводникового самовозбуждения синхронного генератора неуправляемые вентили (диоды)  $VD$  получают питание от трансформаторов тока  $TA$ , вторичный ток которых пропорционален току синхронного генератора  $G$ . Управляемые вентили (тиристоры)  $VS$  соединены с трансформатором  $TE$ , вторичное напряжение которого пропорционально напряжению на выводах генератора (управление тиристорами осуществляется

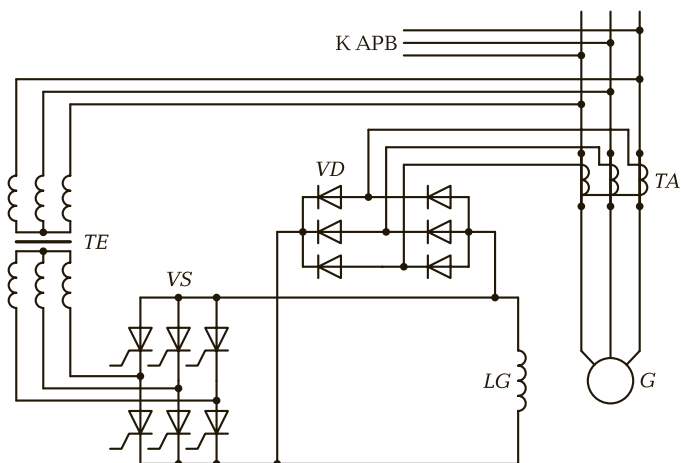


Рис. 11.17. Упрощенная схема полупроводникового самовозбуждения

от автоматического регулятора возбуждения АРВ). Таким образом, на ток, текущий по обмотке возбуждения  $LG$ , влияет и ток, и напряжение генератора.

Диодная группа  $VD$  обеспечивает возбуждение генератора при работе на нагрузку, а также форсировку возбуждения при коротких замыканиях. Тиристорная группа  $VS$  создает возбуждение генератора на холостом ходу и используется для регулирования возбуждения при нормальном режиме.

**Система зависимого электромашинного возбуждения.** Используется на электростанциях в качестве резервного источника возбуждения. Возбудительный агрегат включает в себя:

- асинхронный двигатель, получающий питание от синхронного генератора через понижающий трансформатор;
- возбудитель — генератор постоянного тока параллельного возбуждения, находящийся на одном валу с асинхронным двигателем и не связанный механически с синхронным генератором;
- обмотку возбуждения синхронного генератора, получающую питание от возбудителя.

Несмотря на наличие электромашинного возбудителя такая система возбуждения не является независимой, поскольку питание асинхронного двигателя осуществляется от основного генератора.

## 11.8. ОХЛАЖДЕНИЕ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

При работе синхронного генератора происходит нагрев его обмоток, а также сердечников статора и ротора. Допустимые температуры обмоток могут составлять 100 °С и более, в зависимости от применяемых изоляционных материалов и температуры окружающей среды. При нагреве свыше допустимых температур происходит быстрое ухудшение свойств (старение) изоляции. Для предотвращения перегрева применяют искусственное охлаждение синхронных генераторов.

По способу отвода теплоты от обмоток различают косвенное и непосредственное охлаждение. При *косвенном охлаждении* охлаждающий воздух или водород прогоняется через предусмотренные для этого вентиляционные каналы и немагнитный зазор, для чего на торцах ротора устанавливают вентиляторы. Теплообмен проводников обмоток с охлаждающим газом происходит при этом через изоляцию. При *непосредственном охлаждении* охлаждающий газ или жидкость соприкасается с проводниками непосредственно. По применяемому охлаждающему веществу системы охлаждения подразделяются на воздушную, водородную, жидкостную, а также воздушно-жидкостную.

Проточная система воздушного охлаждения применяется в генераторах небольшой мощности: в турбогенераторах до 2 МВ·А; в гидрогенераторах до 4 МВ·А. Воздух из машинного зала прогоняют через генератор; при этом изоляция обмоток довольно быстро загрязняется, а это сокращает срок службы генератора.

Замкнутая система воздушного охлаждения применяется преимущественно при мощности до 12 МВ·А. В этой системе один и тот же объем воздуха циркулирует по замкнутому контуру. Воздух охлаждается в воздухоохладителе, по трубкам которого циркулирует вода. Охлажденный воздух нагнетается в машину вентиляторами, установленными на роторе.

При значительной длине активной части турбогенератора эффективность охлаждения повышают применением *многоструйной радиальной системы вентиляции*. Система охлаждения разделяется вертикальными плоскостями на ряд секций. В каждую секцию воздух подается из воздушного зазора или из специального осевого канала, после чего он проходит через радиальные вентиляционные каналы и уходит в отводящие камеры. Для восполнения потерь воздуха, которые имеют место из-за утечек, дополнительный воздух поступает в систему охлаждения через масляные фильтры, установленные в камере холодного воздуха.

*Косвенное водородное охлаждение* эффективнее воздушного, поскольку водород имеет в 1,5 раза больший, чем у воздуха, коэффици-

ент теплопередачи и в 7 раз больший коэффициент теплопроводности (коэффициент теплопередачи определяет интенсивность теплообмена путем теплопроводности, конвекции и излучения, а коэффициент теплопроводности учитывает только кондуктивный теплообмен, обусловленный тепловым движением молекул). Кроме того, значительно меньшая плотность водорода по сравнению с воздухом позволяет уменьшить вентиляционные потери почти в 10 раз, что приводит к увеличению КПД генератора приблизительно на 1 %. Важно и то, что отсутствие окисления изоляции в среде водорода увеличивает срок службы изоляции. Наконец, поскольку водород не поддерживает горение, отпадает необходимость в средствах пожаротушения. Однако смесь водорода с воздухом является взрывоопасной, поэтому у машин с водородным охлаждением должна быть обеспечена газонепроницаемость корпуса генератора. При заполнении корпуса генератора водородом, во избежание образования гремучей смеси, воздух сначала вытесняется углекислым газом.

Схемы вентиляции при косвенном водородном и косвенном воздушном охлаждении аналогичны. Отличие состоит в том, что объем охлаждающего водорода ограничивается корпусом генератора, поэтому охладители встраиваются непосредственно в корпус. Эффективность водородного охлаждения повышается при увеличении избыточного давления газа. Кроме того, избыточное давление препятствует проникновению воздуха в корпус генератора. Однако при значительном увеличении давления усложняется обеспечение уплотнения. Обычно устанавливают избыточное давление до 0,4... 0,6 МПа (нормальное атмосферное давление составляет 0,1 МПа).

Генераторы с косвенным водородным охлаждением могут работать и при охлаждении воздухом, но при этом их мощность уменьшается.

*Непосредственное водородное охлаждение* более эффективно, чем косвенное. Проводники обмоток выполняют полыми, и водород подается внутрь проводников. Генераторы с непосредственным водородным охлаждением не могут работать на воздушном охлаждении, поскольку в этом случае обмотка перегревается.

При *непосредственном жидкостном охлаждении* генераторов в качестве охлаждающей жидкости применяется дистиллированная вода или кабельное масло. Эти вещества обладают более высокой, чем водород, теплоотводящей способностью, причем у дистиллированной воды теплоотводящая способность выше, чем у масла. В большинстве случаев мощные генераторы выполняют именно с водяным охлаждением. Однако применение масляного охлаждения позволяет увеличить напряжение обмотки до 110 кВ (электрическая проч-

ность масла выше, чем у воды), и тогда генератор может быть включен в сеть без промежуточной трансформации. Охлаждающая жидкость циркулирует по полым медным проводникам прямоугольного сечения.

В турбогенераторах мощностью от 160 до 800 МВ·А широко применяется охлаждение обмотки статора водой в сочетании с непосредственным охлаждением обмотки ротора и активной стали водородом. Водяное охлаждение обмотки статора применяется и в мощных вертикальных гидрогенераторах; ротор и активная сталь таких генераторов имеет воздушное охлаждение. В капсульных гидрогенераторах применяют водяное охлаждение обмоток статора и ротора.

От всех систем охлаждения, описанных ранее, принципиально отличается перспективная система, в которой охлаждающим веществом является *жидкий гелий*. Внедрение генераторов с жидким гелием, называемых *криогенными генераторами*, или криогенераторами, означало бы зарождение новой энергетики. Дело в том, что при температуре жидкого гелия обмотки генератора становятся сверхпроводящими. Это позволит поднять предел мощности генератора почти вдвое. Коэффициент полезного действия возрастет, а стоимость вырабатываемой электроэнергии уменьшится.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Почему электроэнергию вырабатывают преимущественно в виде энергии переменного тока?
2. Каковы функции статора и ротора в синхронном генераторе?
3. Объясните принцип работы трехфазного синхронного генератора. Как связано число полюсов генератора с частотой вырабатываемого напряжения и частотой вращения ротора?
4. Приведите классификацию типов синхронных генераторов. Как связана конструкция генератора с особенностями турбины, являющейся для генератора приводным двигателем?
5. От чего зависит результирующий магнитный поток синхронного генератора? Каковы особенности реакции якоря синхронного генератора по сравнению с реакцией якоря генератора постоянного тока?
6. Что называется продольным и поперечным током якоря? Каковы различия свойств явнополюсных и неявнополюсных генераторов, касающиеся реакции якоря?
7. Каковы различия реакции якоря синхронного генератора при активной, индуктивной и емкостной нагрузках? В каком случае и по какой причине напряжение на выводах генератора при работе на нагрузку может превышать ЭДС генератора?

8. Запишите уравнение напряжения синхронного генератора. Объясните смысл величин, входящих в уравнение.
9. Начертите векторную диаграмму синхронного генератора. Поясните построение, объясните углы между векторами. Чем различаются векторные диаграммы явнополюсного и неявнополюсного генераторов?
10. Что означает термин «синхронное индуктивное сопротивление по продольной (поперечной) оси»? Начертите преобразованную векторную диаграмму синхронного генератора, включающую падения напряжения на синхронных индуктивных сопротивлениях.
11. Объясните различия внешних характеристик синхронного генератора, построенных при питании генератором активного, индуктивного и емкостного приемников энергии, а также регулировочных и нагрузочных характеристик.
12. Что называется характеристикой короткого замыкания? Каковы особенности этой характеристики? Каковы различия режимов трехфазного, двухфазного и однофазного короткого замыкания?
13. Каким образом по характеристикам генератора определяется синхронное индуктивное сопротивление (насыщенное и ненасыщенное значения)?
14. Как определяется отношение короткого замыкания? Что характеризует этот параметр?
15. Как графически определяется индуктивное сопротивление рассеяния? Как строится характеристический треугольник синхронного генератора? Что показывают стороны этого треугольника?
16. Объясните термины «система независимого возбуждения синхронного генератора», «система самовозбуждения», «форсировка возбуждения». Какими параметрами характеризуется форсировка возбуждения?
17. В чем состоит сущность электромашинного возбуждения синхронного генератора? Каковы недостатки этого способа возбуждения?
18. С какой целью и каким образом осуществляется компаундирование возбуждения?
19. Опишите сущность системы возбуждения с применением вспомогательного индукторного генератора, системы тиристорного возбуждения, системы бесщеточного возбуждения.
20. Как осуществляется полупроводниковое самовозбуждение синхронных генераторов, а также зависимое электромашинное возбуждение?
21. Какие способы охлаждения синхронных генераторов вам известны? Укажите достоинства и недостатки различных способов охлаждения.

## ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

### 12.1. ВКЛЮЧЕНИЕ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ

**Условия включения генератора на параллельную работу с мощной сетью.** На электростанциях устанавливают несколько синхронных генераторов, предназначенных для параллельной работы. При переменном графике нагрузки целесообразно включать параллельно или отключать отдельные машины с таким расчетом, чтобы каждая из них работала с номинальной или близкой к ней нагрузкой. Параллельная работа генераторов увеличивает надежность и бесперебойность электроснабжения потребителей и позволяет иметь меньшую резервную мощность.

Рассмотрим условия включения генератора на параллельную работу с мощной сетью, другими словами, на совместную работу с несколькими генераторами, уже работающими параллельно; при этом общая мощность работающих генераторов значительно превосходит мощность подключаемого. В таком случае подключение генератора практически не изменяет напряжение на общих шинах. Для того чтобы избежать значительных электромеханических переходных процессов в подключаемом генераторе, должны быть соблюдены следующие условия.

**Первое условие.** Действующее значение ЭДС генератора  $E_0$  должно быть равно действующему значению напряжения сети  $U_c$ .

**Второе условие.** Фаза ЭДС генератора в момент включения должна совпадать с фазой напряжения сети.

**Третье условие.** Частота ЭДС генератора  $f_r$  должна быть равна частоте напряжения сети  $f_c$ .

**Четвертое условие.** Последовательность фаз ЭДС генератора и напряжения сети должны совпадать.

Перечисленные условия полезно сравнить с условиями включения на параллельную работу генераторов постоянного тока (см.

подразд. 2.6). Первому и второму условиям, приведенным здесь, отвечают, соответственно, первое и второе условия для генераторов постоянного тока.

Второе условие, сформулированное для синхронного генератора, требует пояснения. Совпадение фаз означает, что перед включением генератора на параллельную работу с сетью напряжение между выводом А генератора и шиной А сети должно быть равно нулю (в случае генераторов постоянного тока этому условию соответствует подключение зажимов «+» всех генераторов к одной общей шине, а зажимов «-» — к другой). Говоря о совпадении фаз напряжений генератора и сети, рассматривают контур, образованный, с одной стороны, всеми параллельно включенными генераторами и, с другой, — их общей нагрузкой. Если же рассматривать контур, образованный, с одной стороны, подключаемым генератором и, с другой, — всеми остальными параллельно работающими генераторами, то приходится говорить о противоположных фазах (встречном включении) генератора и сети.

Третье и четвертое условия, приведенные ранее, относятся к трехфазным машинам переменного тока и отсутствуют среди условий включения на параллельную работу генераторов постоянного тока.

Процедура, предшествующая включению генератора на параллельную работу с сетью, при которой обеспечивается (в той или иной степени) выполнение перечисленных ранее условий, называется *синхронизацией*. В настоящее время для осуществления этой процедуры используются автоматические микропроцессорные *синхронизаторы*. Различают *точную синхронизацию* и *самосинхронизацию*.

**Точная синхронизация.** Для выяснения сущности процесса синхронизации рассмотрим его осуществление вручную, без использования автоматических устройств. При выполнении точной синхронизации добиваются выполнения всех четырех условий синхронизации, перечисленных ранее.

С помощью вольтметров *PV1* и *PV2* (рис. 12.1) или одного переключаемого вольтметра измеряют напряжение сети и напряжение на выводах подключаемого генератора *G*, работающего в режиме холостого хода. Регулируя ток возбуждения подключаемого генератора, добиваются выполнения первого условия включения генератора на параллельную работу с сетью (обмотка возбуждения и регулирующая аппаратура на схеме не показаны).

С помощью частотомеров *PF1* и *PF2* или одного частотомера измеряют частоту напряжения сети и частоту напряжения (ЭДС) под-



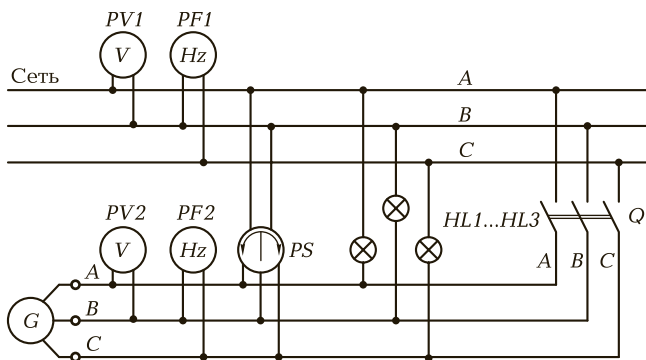


Рис. 12.1. Приборы для выполнения точной синхронизации

ключаемого генератора. Регулируя вращающий момент первичного (приводного) двигателя подключаемого генератора, добиваются приблизительного равенства частот (третье условие). Однако чтобы добиться выполнения в второго условия, частоты должны несколько различаться, чтобы фаза напряжения (ЭДС) подключаемого генератора медленно изменялась по отношению к фазе напряжения сети.

Для выполнения в второго условия применяют электромеханический или электронный синхроскоп *PS* и, как дублирующий, ламповый синхроскоп, состоящий из ламп *HL1*, *HL2*, *HL3*.

В стрелочном электромеханическом синхроскопе используется свойство трехфазной системы токов создавать вращающееся магнитное поле. Стрелка синхроскопа вращается со скоростью, пропорциональной разности частот напряжения подключаемого генератора и сети. Если частота напряжения подключаемого генератора выше частоты напряжения сети, то стрелка будет вращаться в направлении «быстрее», в противном случае — в направлении «медленнее». Регулируя частоту вращения первичного двигателя, добиваются очень медленного вращения стрелки синхроскопа. Генератор может быть подключен к сети выключателем *Q* в момент, когда стрелка синхроскопа принимает вертикальное положение. В этот момент выполняется третье условие: потенциалы выводов *A*, *B* и *C* генератора становятся соответственно равными потенциалам шин *A*, *B* и *C* сети.

Синхроскоп позволяет проверить также четвертое условие включения генератора на параллельную работу: если частота напряжения генератора явно меньше частоты напряжения сети,

а стрелка синхроскопа вращается при этом в сторону «быстрее» (или, наоборот, частота напряжения генератора больше частоты напряжения сети, а стрелка вращается в сторону «медленнее»), то последовательность фаз генератора не соответствует последовательности фаз сети.

Л а м п о в ы й с и н х р о с к о п, показанный на рис. 12.1, включен по схеме «на потухание»: лампа *HL1* включена между выводом *A* генератора и шиной *A* сети; лампа *HL2* — между выводом *B* генератора и шиной *B* сети; лампа *HL3* — между выводом *C* и шиной *C*. При неодинаковых частотах напряжения генератора и сети на каждой лампе синхроскопа имеется переменное периодическое напряжение, мгновенное значение которого  $\Delta u$  изменяется от нуля до удвоенной амплитуды напряжения сети  $2U_{cm}$ , и лампы одновременно мигают. Наиболее благоприятным моментом для подключения генератора к сети выключателем *Q* является «момент синхронизации», когда  $\Delta u$  становится равным нулю и лампы гаснут.

В схеме «на вращение света» лампа *HL1*, как и в схеме «на потухание», включается между выводом *A* генератора и шиной *A* сети; лампа *HL2* включается теперь между выводом *B* генератора шиной *C* сети, а лампа *HL3* — между выводом *C* и шиной *B*. В этом случае до включения выключателя *Q* лампы будут поочередно загораться и гаснуть, создавая эффект вращения света. Момент синхронизации наступает, когда лампа *HL1*, включенная между одноименными выводами сети и генератора, гаснет, а две другие горят с одинаковым накалом.

Лампы накаливания не дают видимого света при напряжении менее 25 % от номинального, поэтому определение момента синхронизации с помощью лампового синхроскопа может быть выполнено с ошибкой 15...25 эл. град. Для более точного определения момента исчезновения разности потенциалов применяют вольтметр, который подключают параллельно лампе, присоединенной к одноименным выводам.

Если ламповый синхроскоп собран по схеме «на потухание», а получается вращение света, то порядок следования фаз сети не совпадает с порядком следования фаз генератора. Несовпадение порядка следования фаз имеет место и тогда, когда ламповый синхроскоп собран по схеме «на вращение» света, а наблюдается одновременное мигание ламп. В этом случае включать генератор в сеть нельзя. Для того чтобы сделать последовательность фаз сети и генератора одинаковыми, нужно поменять местами два провода, идущие от генератора к выключателю *Q*.

Для определения последовательности фаз используется также фазоуказатель.

**Самосинхронизация.** Для включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью методом самосинхронизации необходимо выполнить только одно условие — одинаковую последовательность фаз подключаемого генератора и сети, что осуществляется с помощью фазоуказателя или синхроскопа.

При использовании метода самосинхронизации обмотка возбуждения генератора должна быть отключена от источника питания и замкнута на активное сопротивление, превышающее сопротивление обмотки возбуждения в 5—10 раз. (Если обмотка возбуждения будет разомкнута, то в момент подключения обмотки статора к сети в обмотке возбуждения будет индуцироваться значительная ЭДС, опасная для изоляции обмотки и обслуживающего персонала.)

Ротор невозбужденного генератора приводится во вращение первичным двигателем до скорости, близкой к синхронной, после чего обмотку якоря (статора) включают в сеть. Затем обмотку возбуждения подключают к источнику постоянного напряжения и сразу устанавливают ток возбуждения, при котором ток якоря генератора минимален. Генератор *втягивается в синхронизм*, т. е. начинает вращаться точно с синхронной скоростью, задаваемой сетью, и этим заканчивается процесс самосинхронизации. При использовании метода самосинхронизации отпадает необходимость точного регулирования ЭДС и частоты ЭДС подключаемого генератора, а также тщательного выбора момента включения. Однако в момент включения генератора в сеть в обмотке якоря может появиться ток, превышающий номинальный в 3—7 раз.

## 12.2. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ГЕНЕРАТОРА С СЕТЬЮ

**Работа генератора в режиме холостого хода.** После правильного включения генератора на параллельную работу с сетью ток в обмотке якоря подключенного генератора отсутствует, т. е. генератор работает вхолостую: он не отдает мощность в сеть и не получает ее из сети. ЭДС генератора  $E_0$  равна при этом напряжению на его зажимах  $U_r$ . Напряжение генератора, подключенного параллельно к сети, равно, в свою очередь, напряжению сети  $U_c$ . При дальнейшем анализе удобно считать, что напряжение генератора не синфазно напряжению сети, а смещено по фазе относительно него на угол

180°. Такой сдвиг фаз получается при обходе контура, образованного, с одной стороны, подключенным генератором и, с другой стороны, всеми остальными параллельно работающими генераторами (см. пояснение ко второму условию включения генератора на параллельную работу с сетью, подразд. 12.1). В таком случае на векторной диаграмме векторы  $\underline{U}_c$  и  $\underline{U}_r$  будут изображаться равными по модулю и противоположными по направлению.

**Изменение вращающего момента первичного двигателя.** Если увеличить мощность первичного двигателя, вращающего ротор подключенного к сети генератора, то возникнет вращающий момент  $M_1$ . Под действием этого момента ротор генератора приобретет некоторое ускорение относительно магнитного поля сети, вращающегося с синхронной частотой  $\Omega_c$ . При этом возникнет тормозной электромагнитный момент  $M$ , действующий на ротор. Причина возникновения тормозного момента ясна из того, что ротор, по обмотке которого течет ток возбуждения, и статор, в котором действует общее напряжение сети, представляют собой электромагниты. Внешней силе, удаляющей один магнит от другого, противодействует сила притяжения между магнитами.

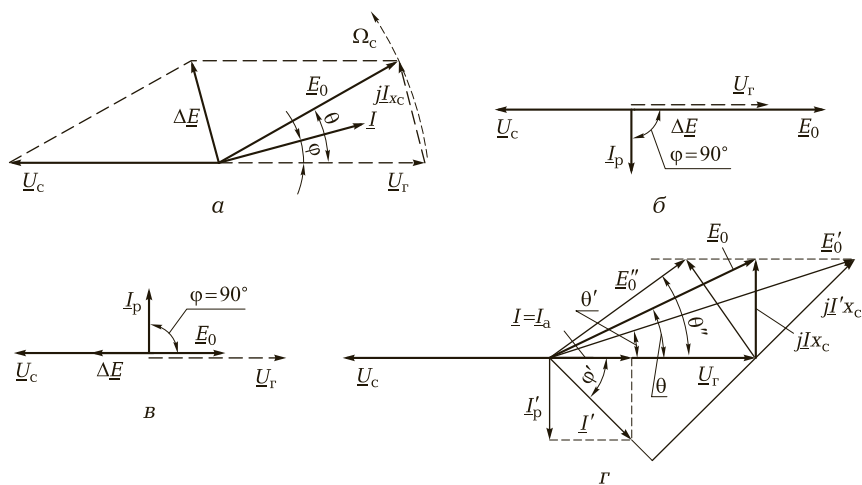


Рис. 12.2. Векторные диаграммы генератора, работающего параллельно с сетью:

*a* — при увеличенном вращающем моменте первичного двигателя; *б* — при перевозбуждении генератора и нулевой активной мощности; *в* — при недо возбуждении генератора и нулевой активной мощности; *г* — при различном возбуждении генератора и ненулевой активной мощности

При равенстве тормозного момента  $M$  вращающему моменту  $M_1$  ротор окажется смещенным в пространстве на некоторый угол  $\theta$  (эл. град.) относительно положения, которое он занимал в режиме холостого хода, и далее продолжит вращение с синхронной частотой  $\Omega_c$ . Таким образом, если при холостом ходе вектор ЭДС генератора  $\underline{E}_0$  совпадает по значению и направлению с вектором напряжения на выводах генератора  $\underline{U}_r$ , то при увеличении вращающего момента вектор  $\underline{E}_0$  поворачивается вместе с самим ротором относительно вектора  $\underline{U}_r$  в направлении вращения ротора на угол  $\theta$ , что показано на рис. 12.2, а (вектор  $\underline{U}_r$  не может изменить свое значение и направление, поскольку он жестко связан с вектором напряжения мощной сети).

При холостом ходе ток якоря рассматриваемого генератора был равен нулю, поскольку в контуре, образованном этим генератором и сетью, результирующая ЭДС была равна нулю:  $\underline{U}_c + \underline{E}_0 = 0$ . Теперь, когда вектор ЭДС генератора изменил свое направление относительно вектора напряжения сети, появилась ненулевая результирующая ЭДС  $\Delta \underline{E} = \underline{U}_c + \underline{E}_0$ , создающая ток  $I$  в обмотке якоря. Поскольку рассматривается мощная сеть, то общим сопротивлением параллельно включенных генераторов можно пренебречь, и тогда ток якоря рассматриваемого генератора зависит, главным образом, от его синхронного индуктивного сопротивления  $x_c$  (активным сопротивлением обмотки якоря рассматриваемого генератора также пренебрегаем). Итак,

$$\Delta \underline{E} = \underline{U}_c + \underline{E}_0 = jI x_c. \quad (12.1)$$

Векторная диаграмма неявнополюсного генератора (см. рис. 11.12) поясняет записанное уравнение. Согласно рис. 11.12  $\underline{U}_r = \underline{E}_0 - jI x_c$  и с учетом того, что вектор  $\underline{U}$  на этой диаграмме представляет вектор напряжения генератора:  $\underline{U} = \underline{U}_r$ . Вектор напряжения сети, показанный на рис. 12.2, а, противоположен ему:  $\underline{U}_c = -\underline{U}_r$ , тогда имеем:  $-\underline{U}_c = \underline{E}_0 - jI x_c$ , откуда и получается уравнение (12.1).

Вектор тока якоря  $I$  в соответствии с уравнением (12.1) построен на векторной диаграмме (см. рис. 12.2, а) повернутым относительно вектора  $\Delta \underline{E}$  (и вектора  $jI x_c$ ) на  $90^\circ$  в сторону отставания. С другой стороны, ток  $I$  опережает по фазе напряжение генератора  $U_r$  на угол  $\varphi$ . Генератор отдает в сеть активную мощность  $P_2 = m U_r I \cos \varphi$ ; механическая энергия, затрачиваемая первичным двигателем на преодоление тормозного момента, превращается в электрическую энергию (ср. с рассуждениями, приведенными в подразд. 1.1 между равенствами (1.3) и (1.4)). Чем больше вращающий момент первичного двигателя, тем бóльшую мощность генератор отдает в сеть.

Вращающий момент, однако, не должен превышать некоторое предельное значение, при котором генератор выпадает из синхронизма (см. далее подразд. 12.4).

Если же, исходя из режима холостого хода, уменьшить вращающий момент первичного двигателя рассматриваемого генератора или совсем отключить первичный двигатель, то вращающееся магнитное поле статора, обеспечиваемое трехфазным напряжением сети, будет вести за собой ротор. В этом случае генератор будет работать в режиме двигателя, потребляя энергию из сети (двигательный режим синхронной машины рассматривается в подразд. 13.1).

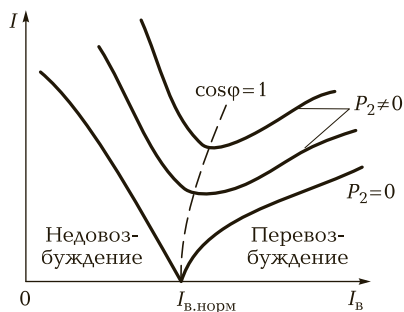
Итак, *изменяя вращающий момент первичного двигателя, можно регулировать активную мощность синхронной машины, отдаваемую ею в сеть, а также переводить машину в режим двигателя.*

**Изменение тока возбуждения при постоянном вращающем моменте и нулевой активной мощности.** Снова в качестве исходного рассматриваем режим холостого хода синхронного генератора. Если, не изменяя вращающий момент первичного двигателя, увеличить ток возбуждения генератора (т. е. установить режим *перевозбуждения генератора*), то увеличится его ЭДС  $E_0$  (рис. 12.2, б). Модуль результирующей ЭДС  $\Delta E$ , действующей в контуре генератор — сеть, будет определяться как разность модулей ЭДС генератора и напряжения сети ( $\Delta E = E_0 - U_c$ ), что следует из уравнения (12.1) в случае, когда ЭДС  $E_0$  противофазна напряжению  $U_c$ , а модуль ЭДС генератора превышает модуль напряжения сети. При этом результирующая ЭДС  $\Delta E$  имеет ту же фазу, что и ЭДС генератора  $E_0$ . Результирующая ЭДС  $\Delta E$  создает ток якоря, отстающий по фазе от этой ЭДС на  $90^\circ$ . В данном случае этот ток отстает также на  $90^\circ$  и *от напряжения генератора*, т. е. является реактивным током  $I_p$ . Активная мощность генератора  $P_2 = mU_r I_c \cos \varphi = mU_r I_c \cos 90^\circ = 0$ , т. е. при изменении тока возбуждения не происходит перераспределения активной мощности между рассматриваемым генератором и сетью.

Отстающий ток  $I_p$  вызывает продольную размагничивающую реакцию якоря генератора (см. подразд. 11.3). Относительно *напряжения сети* этот ток является опережающим; он создает для всех остальных генераторов продольную намагничивающую реакцию якоря.

Если, исходя из режима холостого хода, уменьшить ток возбуждения генератора (установить режим *недовозбуждения*), то ЭДС генератора  $E_0$  уменьшится (рис. 12.2, в). Модуль результирующей ЭДС  $\Delta E$  будет определяться как  $\Delta E = U_c - E_0$ , при этом результирующая ЭДС  $\Delta E$  противофазна ЭДС генератора  $E_0$ . Результирующая ЭДС  $\Delta E$  создает ток якоря, отстающий по фазе от этой ЭДС на  $90^\circ$ , но опере-

Рис. 12.3. U-образные характеристики синхронного генератора



жающий на  $90^\circ$  напряжение генератора. Активная мощность генератора, как и в случае перевозбуждения, остается равной нулю.

Опережающий ток  $I_p$  обуславливает продольную намагничивающую реакцию якоря генератора (см. подразд. 11.3). Относительно напряжения сети этот ток является отстающим, создавая для остальных генераторов размагничивающую реакцию якоря.

Если изменять ток возбуждения и измерять при этом ток якоря генератора, включенного на параллельную работу с сетью, можно получить *U-образную характеристику генератора*, называемую так из-за ее формы, — зависимость  $I(I_b)$ . При активной мощности, равной нулю, U-образная характеристика имеет точку на оси тока возбуждения, поскольку при некотором токе возбуждения, называемом нормальным  $I_{b, \text{норм}}$ , ток якоря равен нулю (режим холостого хода). Как при увеличении, так и при уменьшении тока возбуждения ток якоря возрастает, являясь чисто реактивным. Активная мощность при этом остается равной нулю (нижняя кривая на рис. 12.3).

**Изменение тока возбуждения при постоянном вращающем моменте и ненулевой активной мощности.** Увеличим вращающий момент первичного двигателя. Отрегулируем ток возбуждения так, чтобы ток якоря принял наименьшее значение. В этом режиме генератор отдает в сеть чисто активную мощность; ток якоря генератора совпадает по фазе с напряжением на его выводах. На рис. 12.2, г такому режиму соответствует векторная диаграмма, включающая в себя векторы, в обозначениях которых отсутствуют штрихи (сравнить с рис. 12.2, а).

Теперь, не изменяя вращающий момент, увеличим ток возбуждения (случай перевозбуждения). Ток якоря при этом увеличится (вектор  $I'$  на рис. 12.2, г), но лишь за счет реактивной составляющей  $I'_p$ ; активная составляющая  $I_a$  останется неизменной. Действительно, если вращающий момент не изменяется, то не изменяется и активная

мощность, которую генератор отдает в сеть. Активная мощность определяется выражением  $P_2 = mU_r I_c \cos\varphi$ . При неизменном напряжении на выводах генератора  $U_r$ , равном напряжению сети, к которой он подключен, должно оставаться неизменным значение величины  $I_c \cos\varphi$ , которая и представляет собой активную составляющую тока якоря. Ток якоря при перевозбуждении является отстающим по отношению к напряжению генератора и опережающим по отношению к напряжению сети, как и в случае нулевой активной мощности.

Постоянству активной составляющей тока якоря соответствует постоянство проекции этого тока на горизонтальную ось. Другими словами, конец вектора тока якоря при изменении тока возбуждения скользит по вертикальной прямой. Вектор падения напряжения на синхронном индуктивном сопротивлении  $jI_c X_c$  перпендикулярен вектору  $I$ , на что указывает мнимая единица  $j$ . В таком случае конец вектора  $jI_c X_c$  (а также конец вектора ЭДС генератора  $E_0$ ) при изменении тока возбуждения скользит по горизонтальной прямой, если считать, что значение  $x_c$  не меняется. Обозначения векторов, соответствующих перевозбуждению, даны на рис. 12.2, г с одним штрихом.

При недовозбуждении активная мощность и активная составляющая тока якоря также не меняются. Ток якоря  $I''$  в этом случае опережает напряжение генератора  $U_r$  и отстает от напряжения сети. На векторной диаграмме вектор тока  $I''$ , перпендикулярный вектору  $jI'' X_c$ , повернут относительно вектора напряжения генератора  $U_r$  против часовой стрелки (на рис. 12.2, г вектор  $I''$  не показан, чтобы не усложнять рисунок).

Для каждого значения активной мощности можно построить U-образную характеристику, как ранее для случая нулевой активной мощности (см. рис. 12.3). Нижняя точка каждой из характеристик (точка минимального тока якоря) соответствует *нормальному возбуждению*, при котором ток якоря не имеет реактивной составляющей; при этом сдвиг фаз между током якоря и напряжением генератора  $\varphi = 0$ ;  $\cos\varphi = 1$ . Если соединить точки нормального возбуждения всех U-образных характеристик, то получится кривая, отклоняющаяся вправо. Дело в том, что с возрастанием тока якоря, имеющем место при увеличении активной мощности, увеличивается поток реакции якоря и поток рассеяния. Чтобы фазовый угол  $\varphi$  сохранить при этом неизменным (равным нулю), нужно скомпенсировать эти потоки путем увеличения потока полюсов, а для этого нужно увеличить ток возбуждения.

Из рис. 12.3 видно, что правые части U-образных характеристик более пологи, чем левые. Это означает, что увеличивающийся ток



возбуждения вызывает меньшее изменение тока статора, чем уменьшающийся. Причина заключается в том, что большой ток возбуждения вызывает насыщение магнитной цепи генератора.

**Общие выводы, касающиеся параллельной работы генератора с мощной сетью.** Сравним воздействие изменения тока возбуждения и вращающего момента на синхронный генератор, работающий автономно, с воздействием этих факторов на генератор, работающий параллельно с мощной сетью.

Если изменить ток возбуждения генератора, работающего *автономно*, то увеличится его ЭДС и напряжение на его выводах. Если же генератор работает *параллельно с мощной сетью*, то при изменении тока возбуждения напряжение на выводах генератора останется практически неизменным и равным напряжению сети. Однако ЭДС генератора изменится, и это приведет к появлению реактивного тока: при увеличении ЭДС этот ток будет отставать по фазе от напряжения генератора, а при уменьшении ЭДС — опережать напряжение генератора.

Если увеличить вращающий момент на валу генератора, работающего *автономно*, то увеличится частота вращения и, значит, частота вырабатываемой ЭДС. Если же генератор работает *параллельно с мощной сетью*, то увеличение вращающего момента приводит к увеличению мощности, которую генератор отдает в сеть. Частота вращения при этом практически не изменяется, и частота ЭДС остается равной частоте напряжения сети.

Уменьшая вращающий момент генератора, работающего параллельно с сетью, можно перевести его в режим двигателя.

**Параллельная работа двух генераторов, соизмеримых по мощности.** Если параллельно работают два генератора с близкими мощностями, то изменение тока возбуждения одного из них приведет к изменению напряжения на общих шинах. Изменение вращающего момента на валу одного из генераторов вызовет, помимо изменения отдаваемой им мощности, изменение частоты вращения обоих генераторов и, следовательно, изменение частоты напряжения. Чтобы осуществить перевод нагрузки с одного генератора на другой, не изменяя при этом частоту напряжения на их общих шинах, необходимо одновременно увеличить вращающий момент первичного двигателя нагружаемого генератора и уменьшить вращающий момент первичного двигателя разгружаемого. Для поддержания напряжения на шинах на постоянном уровне нужно одновременно увеличить ток возбуждения нагружаемого генератора и уменьшить ток возбуждения разгружаемого. При этом поддерживается также постоянство коэффициента мощности  $\cos\varphi$  обоих генераторов. Это

применимо и для случая параллельной работы небольшого числа генераторов, мощность каждого из которых соизмерима с общей мощностью всех генераторов.

## 12.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ МОЩНОСТЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

**Вывод уравнения электромагнитной мощности неявнополюсного генератора.** Для дальнейшего изучения свойств генератора, работающего параллельно с другими генераторами, рассмотрим, от чего зависит его электромагнитная мощность.

Энергетическая диаграмма синхронного генератора аналогична энергетической диаграмме генератора постоянного тока (см. рис. 2.1). Электромагнитная мощность генератора  $P_{эм}$  — это та часть потребляемой механической мощности  $P_1$ , которая передается якору через воздушный зазор. Электромагнитная мощность отличается от полезной мощности  $P_2$ , которую генератор отдает во внешнюю сеть, на величину электрических потерь в обмотке якора  $P_я$ :

$$P_{эм} = P_2 + P_я = mU_r I \cos\varphi + mI^2 R_я,$$

где  $m$  — число фаз машины;  $U_r$  и  $I$  — фазные напряжение и ток соответственно;  $\varphi$  — угол сдвига фаз между ними;  $R_я$  — сопротивление фазы обмотки якора, расположенной на статоре синхронного генератора.

В машинах средней мощности электрические потери в якоре не превышают 1 % полезной мощности. Поэтому можно принять

$$P_{эм} \approx mU_r I \cos\varphi. \quad (12.2)$$

В дальнейшем потребуется выражение электромагнитной мощности через угол сдвига фаз  $\theta$  между ЭДС генератора  $E_0$  и напряжением на его выводах  $U_r$ . Получим это выражение для неявнополюсного генератора. Фазовому углу  $\theta$  соответствует геометрический угол, измеряемый в электрических градусах, между положением ротора при нагрузке и его положением при холостом ходе (см. подразд. 12.2). На векторной диаграмме неявнополюсного генератора (см. рис. 11.12) построим луч  $eh$  в направлении вектора  $\underline{U} = \underline{U}_r$ . Проведем к этому лучу перпендикуляр  $bh$  из точки  $b$ . Угол  $hbe$  с вершиной в точке  $b$  равен по построению углу сдвига фаз  $\varphi$  между током якора (статора) и напряжением на выводах генератора. Длина гипотенузы  $be$  прямоугольного треугольника  $hbe$  равна  $I x_c$ , где  $x_c$  — синхронное индуктивное сопротивление неявнополюсного генератора (см. вы-

ражение (11.19)). Тогда длина катета  $bh$ , прилежащего к углу  $\varphi$ , равна  $I x_c \cos \varphi$ .

С другой стороны, из прямоугольного треугольника, в котором отрезок  $bh$  является катетом, противолежащим углу  $\theta$ , а гипотенуза равна  $E_0$ , видим  $bh = E_0 \sin \theta$ . Таким образом, имеем  $I x_c \cos \varphi = E_0 \sin \theta$ , откуда  $I \cos \varphi = \frac{E_0}{x_c} \sin \theta$ . Последнее выражение подставим в равенство (12.2), получив, таким образом, искомое уравнение электромагнитной мощности:

$$P_{\text{эм}} = m U_{\Gamma} \frac{E_0}{x_c} \sin \theta \quad (12.3)$$

(знак приблизительного равенства заменен на знак равенства).

Электромагнитный момент, развиваемый машиной,  $M = \frac{P_{\text{эм}}}{\Omega_c}$ , где  $\Omega_c$  — синхронная частота вращения ротора (сравнить с выражением электромагнитного момента асинхронного двигателя (9.28)). В соответствии с уравнением (12.3) получим

$$M = m U_{\Gamma} \frac{E_0}{\Omega_c x_c} \sin \theta. \quad (12.4)$$

**Угловая характеристика синхронного генератора.** Из уравнений (12.3) и (12.4) видно, что при заданных ЭДС генератора  $E_0$  и напряжении на его выводах  $U$  мощность генератора и его электромагнитный момент однозначно связаны с углом  $\theta$  между вектором ЭДС  $\underline{E}_0$  и вектором напряжения  $\underline{U}_{\Gamma}$ . Постоянство значений величин  $E_0$  и  $U_{\Gamma}$  имеет место при параллельной работе генератора с сетью при условиях постоянства напряжения сети и постоянства тока возбуждения генератора. При названных условиях уравнение (12.3) является уравнением *угловой характеристики* генератора, т. е. уравнением зависимости электромагнитной мощности  $P_{\text{эм}}$  от угла  $\theta$  при  $E_0 = \text{const}$  и  $U_{\Gamma} = \text{const}$ . Угловая характеристика (рис. 12.4) представляет собой синусоиду с амплитудой

$$P_{\text{эмmax}} = m U_{\Gamma} \frac{E_0}{x_c} = m U_{\Gamma} I_{\text{к}}, \quad (12.5)$$

где  $I_{\text{к}} = E_0/x_c$  — ток трехфазного короткого замыкания при данном токе возбуждения (см. выражение (11.25), учитывая, что у неявнополюсного генератора синхронные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям равны:  $x_c = x_q = x_d$ , что отмечено в подразд. 11.4).

На рис. 12.4 символом  $P_{\text{эм.ном}}$  обозначена номинальная мощность;  $\theta_{\text{ном}}$  — соответствующий ей угол.

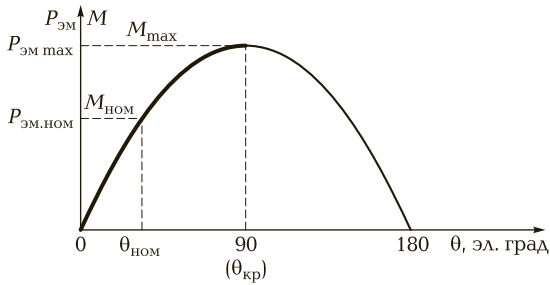


Рис. 12.4. Угловая характеристика неявнополюсного генератора

Устойчивой работе генератора соответствует левая ветвь угловой характеристики, показанная более жирной линией. При угле  $\theta > 90$  эл. град. генератор выходит из синхронизма (см. далее подразд. 12.4).

**Электромагнитная мощность явнополюсного генератора.** Подчеркнем, что уравнения электромагнитной мощности (12.3) и электромагнитного момента (12.4) были получены на основе векторной диаграммы *неявнополюсного* генератора (см. рис. 11.12). В эти выражения входит синхронное индуктивное сопротивление  $x_c$ . У *явнополюсного* генератора, векторные диаграммы которого показаны на рис. 11.11, различаются синхронные индуктивные сопротивления по продольной ( $x_d$ ) и поперечной ( $x_q$ ) осям; точки  $d$  и  $b$  не совпадают, и для электромагнитной мощности уравнение (12.3) оказывается несправедливым. Приведем без вывода уравнение электромагнитной мощности, которое может быть получено из анализа векторной диаграммы явнополюсного генератора:

$$P_{эм.яв} = mU_r \frac{E_0}{x_c} \sin \theta + \frac{mU_r^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (12.6)$$

Как видим, приведенное уравнение отличается от уравнения, полученного для неявнополюсного генератора, наличием второго слагаемого. Деление обеих частей уравнения (12.6) на синхронную угловую скорость  $\Omega_c$  дает уравнение электромагнитного момента:

$$M_{яв} = mU_r \frac{E_0}{\Omega_c x_c} \sin \theta + \frac{mU_r^2}{2\Omega_c} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (12.7)$$

Первое слагаемое называют *основным электромагнитным моментом*  $M_{осн}$ , второе — *реактивным*  $M_p$ :

$$M_{осн} = mU_r \frac{E_0}{\Omega_c x_c} \sin \theta; \quad M_p = \frac{mU_r^2}{2\Omega_c} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (12.8)$$

Из выражения реактивного момента видно, что если выполняется равенство  $x_q = x_d$  (случай неявнополюсного генератора), то  $M_p = 0$ .

Важно отметить, что основной момент  $M_{\text{осн}}$  определяется как напряжением на выводах генератора  $U_r$ , так и ЭДС генератора  $E_0$ , которая зависит от магнитного потока ротора, обусловленного током обмотки возбуждения. Реактивный момент  $M_p$  не зависит от ЭДС  $E_0$ , и поэтому не зависит от тока обмотки возбуждения. В случае если генератор включен на параллельную работу с сетью, реактивный момент зависит от напряжения сети, равного напряжению на выводах генератора.

Все изложенное об электромагнитной мощности и электромагнитном моменте синхронного генератора относится также и к синхронному двигателю (см. далее гл. 13) с той разницей, что у двигателя электромагнитный момент является вращающим, а не тормозным. Наличие реактивного момента у неявнополюсной машины позволяет получить двигатель без обмотки возбуждения (см. далее подразд. 13.3).

## 12.4. УСТОЙЧИВОСТЬ РАБОТЫ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

**Статическая устойчивость.** *Статической устойчивостью* агрегата, состоящего из первичного двигателя и генератора, называется его способность самостоятельно восстанавливать исходный режим работы при небольших отклонениях от состояния равновесия. Рассмотрим вопрос статической устойчивости применительно к *неявнополюсному генератору, работающему параллельно с мощной сетью*. Электромагнитная мощность генератора  $P_{\text{эм}}$  (см. уравнение (12.3)) определяется в этом случае только углом  $\theta$  между осями магнитных полей ротора и статора (или между направлениями вектора ЭДС генератора  $\underline{E}_0$  и вектора напряжения на его зажимах  $\underline{U}_r$ ). Прочие величины, входящие в уравнение (12.3), остаются при параллельной работе неизменными, как уже отмечалось в подразд. 12.3.

При равенстве тормозного электромагнитного момента  $M$  вращающему моменту  $M_1$  ротор вращается с постоянной частотой, сохраняя неизменным угол  $\theta$ .

Если по каким-либо причинам вращающий момент  $M_1$  немного возрастет, а затем уменьшится до прежнего значения, то ротор сместится вперед по направлению вращения, т. е. угол  $\theta$  получит некоторое приращение  $\Delta\theta$ . Из угловой характеристики неявнополюсно-

го генератора, работающего с мощной сетью (см. рис. 12.4) видно, что до значения  $\theta = 90$  эл. град. при увеличении  $\theta$  увеличивается и электромагнитная мощность  $P_{эм}$ , а вместе с ней — тормозной электромагнитный момент  $M$ . Таким образом, возникает избыточный тормозной момент  $\Delta M = \Delta P_{эм} / \Omega_c$ , который приводит к возвращению агрегата первичный двигатель — генератор в первоначальное состояние. Более подробно этот процесс рассматривается далее.

Если же вращающий момент несколько уменьшится, а затем увеличится до прежнего значения, то ротор получит отрицательное ускорение, и угол  $\theta$  уменьшится. Но при этом уменьшится и тормозной момент  $M$ : он станет меньше вращающего момента, и результирующий положительный момент восстановит состояние системы.

Таким образом, в пределах изменения угла  $\theta$  от 0 до 90 эл. град. работа генератора, подключенного параллельно сети, устойчива.

Если же угол  $\theta$  превысит 90 эл. град., то увеличение вращающего момента приведет к уменьшению тормозного момента, угол  $\theta$  еще более увеличится, и генератор выйдет из синхронизма.

Итак, для неявнополюсного генератора критический угол  $\theta_{кр}$ , при превышении которого невозможна устойчивая работа агрегата первичный двигатель — генератор, составляет 90 эл. град.

Зависимость электромагнитной мощности от угла  $\theta$  *явнополюсного генератора* определяется уравнением (12.6). Эта зависимость, как и зависимость электромагнитного момента от угла  $\theta$  (уравнение (12.7)), не является синусоидальной. Она представляет собой сумму двух синусоид; причем вторая синусоида имеет в 2 раза меньший период, чем первая (во втором слагаемом аргумент синуса в 2 раза больше, чем в первом). Первая синусоида возрастает на интервале  $\theta$  от 0 до 90 эл. град., а вторая синусоида, имеющая всегда меньшую амплитуду, возрастает при изменении угла  $\theta$  от 0 до 45 эл. град., а далее убывает, обращаясь в нуль при  $\theta = 90$  эл. град. На интервале от 90 до 180 эл. град. первая синусоида убывает от максимального значения до нуля, а вторая на протяжении этого интервала проходит отрицательные значения. Суммарная несинусоидальная зависимость  $P_{эм}(\theta)$  или  $M(\theta)$  явнополюсного генератора возрастает на интервале от 0 до  $\theta_{кр} = 60 \dots 80$  эл. град. (область статической устойчивости) и убывает до нуля на интервале от  $\theta_{кр}$  до 180 эл. град.

Как у неявнополюсного, так и у явнополюсного генератора углу  $\theta_{кр}$  соответствует максимальный электромагнитный момент  $M_{max}$ . Отношение максимального момента к номинальному  $M_{max}/M_{ном}$  называется *перегрузочной способностью* машины. Этот параметр для различных генераторов принимает значение от 1,4 до 3.

**Колебания синхронных генераторов.** Итак, если на ротор генератора, работающего при значении угла  $\theta$ , меньшем критического, кратковременно подействует избыточный вращающий момент, то появится и дополнительный тормозной электромагнитный момент, возвращающий генератор в состояние равновесия, при котором вращающий момент  $M_1$  равен тормозному моменту  $M$ . Однако после достижения этого состояния угол  $\theta$  продолжит уменьшаться в силу инертных свойств вращающихся частей генератора и первичного двигателя (напомним, что инертные свойства вращающегося тела определяются его моментом инерции, см. подразд. 3.3). Когда угол  $\theta$  становится меньше угла, соответствующего состоянию равновесия, тормозной момент становится меньше вращающего. Угол  $\theta$  достигает некоторого наименьшего значения, после чего снова начинает увеличиваться. Ротор вновь проходит равновесное состояние, и угол  $\theta$ , продолжая увеличиваться, достигает наибольшего значения. Далее процесс повторяется. Таким образом, хотя ротор неизменно вращается в одну сторону, скорость его вращения испытывает колебания: ее значение становится то ниже синхронной скорости  $\Omega_c$ , то выше ее. С течением времени эти колебания затухают: разность между максимальным и минимальным значениями угла  $\theta$  становится все меньше и меньше. После затухания колебаний ротор начинает стабильно вращаться с угловой скоростью  $\Omega_c$ , пока изменение вращающего момента или электрической нагрузки генератора не вызовет новый колебательный процесс.

Затухание колебаний вызвано потерями энергии, прежде всего, имеющими магнитное происхождение. Во время колебаний, когда ротор перемещается относительно магнитного поля статора, в сердечнике ротора индуцируются вихревые токи. Взаимодействие магнитного поля вихревых токов с полем статора создает *успокаивающий момент*, действующий в направлении, противоположном направлению относительного перемещения.

Возникновение и затухание колебаний ротора синхронной машины можно сравнить с колебательным процессом, происходящим после выведения из положения равновесия груза, подвешенного на пружине (пружинного маятника). Груз после затухания колебаний приходит в состояние покоя относительно земли, а ротор синхронной машины — в состояние покоя относительно вращающегося поля статора.

Колебания ротора, также как колебания маятника, могут быть свободными и вынужденными. Ранее рассматривались свободные (собственные) колебания. Вынужденные колебания ротора происходят при периодических неравномерностях вращения приводного

двигателя, что имеет место, в частности, в поршневом дизельного двигателя. При совпадении частоты вынужденных колебаний с частотой собственных колебаний возникает механический резонанс, когда амплитуда колебаний резко увеличивается и параллельная работа генераторов становится невозможной.

В *невнополюсных* генераторах специальных мер для успокоения колебаний не применяют; колебания в них затухают только благодаря вихревым токам, возникающим в сердечнике ротора.

В *явнополюсных* генераторах применяют у с п о к о и т е л ь н у ю (д е м п ф е р н у ю) о б м о т к у. По своей конструкции демпферная обмотка подобна короткозамкнутой обмотке асинхронного двигателя — «беличьей клетке» (см. рис. 9.2). Стержни такой обмотки закладываются в пазы, предусмотренные в полюсных наконечниках синхронной машины. Торцевые соединения, имеющие вид колец, выполняются за пределами полюсных наконечников.

**Динамическая устойчивость.** Говоря о статической устойчивости синхронного генератора, мы рассматривали его реакцию на малые изменения вращающего момента или электрической нагрузки. *Динамической устойчивостью* синхронной машины называют ее способность не выпадать из синхронизма при резких изменениях режима работы.

При резких изменениях нагрузки (например, при коротком замыкании в сети) возникают интенсивные колебания ротора — чередования ускорений и торможений. Машина выпадет из синхронизма, т. е. окажется динамически неустойчивой, если энергия, запасенная при ускорении ротора, превысит энергию, возвращаемую генератором в сеть при торможении ротора.

Для повышения динамической устойчивости применяют *форсировку возбуждения* (см. подразд. 11.7), при которой с большой скоростью увеличивается ток возбуждения и, значит, ЭДС обмотки якоря.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите условия включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью. Сравните их с условиями включения на параллельную работу генераторов постоянного тока.
2. Опишите процедуру точной синхронизации генератора с сетью при выполнении ее без применения автоматических устройств.
3. Какие условия должны быть соблюдены для осуществления самосинхронизации генератора с сетью?
4. Каким образом регулируется активная и реактивная мощности синхронного генератора, отдаваемые им в сеть? Что называет-



- ся нормальным возбуждением синхронного генератора? Что означают термины «перевозбуждение» и «недовозбуждение» синхронного генератора?
5. Что называется U-образной характеристикой синхронного генератора? Объясните вид U-образных характеристик при нулевой и ненулевой активной мощностях генератора?
  6. В чем состоят различия между воздействием изменения тока возбуждения и вращающего момента на синхронный генератор, работающий автономно, и воздействием этих факторов на генератор, работающий параллельно с мощной сетью?
  7. Каковы особенности параллельной работы двух синхронных генераторов соизмеримой мощности по сравнению с параллельной работой генератора и мощной сети?
  8. От чего зависят электромагнитная мощность и электромагнитный момент синхронного генератора при заданных ЭДС генератора и напряжении на его выводах? Что называется угловой характеристикой синхронного генератора?
  9. Что означает термин «статическая устойчивость»? В чем заключается условие статической устойчивости синхронного генератора?
  10. Опишите процесс колебаний синхронного генератора, возникающий при изменении нагрузки или вращающего момента. Какие меры принимаются для успокоения колебаний генератора?
  11. Что называется динамической устойчивостью синхронной машины? Какие меры принимаются для повышения динамической устойчивости?

## СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ И КОМПЕНСАТОРЫ

### 13.1. СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

**Принцип работы трехфазного синхронного двигателя.** Конструкции синхронного двигателя и синхронного генератора аналогичны. Одна и та же синхронная машина может работать как в режиме двигателя, так и в режиме генератора (см. принцип обратимости электрических машин в подразд. 3.1 и 12.2). Обмотка возбуждения синхронного двигателя, как и генератора, требует питания постоянным током. Обмотку возбуждения помещают на роторе. Обмотка якоря двигателя, расположенная на статоре, подключается к сети трехфазного переменного тока; при этом она создает вращающееся магнитное поле (см. подразд. 8.1).

Обмотка возбуждения может иметь одну пару полюсов ( $p = 1$ ) или большее их число. Обмотка якоря (статора) должна создавать поле, характеризующееся таким же числом полюсов. Вращение поля статора происходит с частотой  $n$ , измеряемой в оборотах в минуту:

$$n = \frac{60f}{p}, \quad (13.1)$$

где частота питающего напряжения  $f$  выражается в герцах (см. подразд. 8.2 и формулу (8.4)).

Из формулы (13.1) следует, что при  $p = 1$  за один цикл изменения напряжения происходит полный оборот поля статора (поворот на  $360^\circ$ ). При  $p = 2$  за один цикл изменения напряжения поле статора поворачивается на  $180^\circ$ , что соответствует в этом случае  $360$  эл. град. В любом случае, как отмечалось в подразд. 8.1, за время одного цикла изменения напряжения поворот поля происходит на угол, соответствующий углу между двумя ближайшими одноименными полюсами магнитной системы статора, т. е. углу, соответствующему двум полюсным делениям.

В результате взаимодействия вращающегося магнитного поля статора с магнитным полем обмотки возбуждения, расположенной на роторе, ротор будет вращаться с частотой, равной частоте вращения поля статора  $n$ , т. е. *синхронно с полем статора*. Вращение ротора вызвано тем, что каждый полюс ротора притягивается к противоположному полюсу магнитного поля статора. (По той же причине будет вращаться постоянный магнит, выполненный в виде полосы и свободно посаженный на ось, если вокруг него по окружности перемещать другой магнит.) Благодаря притяжению полюсов создается электромагнитный момент, являющийся в этом случае вращающим (в отличие от генератора, где электромагнитный момент, имеющий то же самое происхождение, является тормозным, см. подразд. 12.3).

При изменении нагрузки на валу синхронного двигателя частота вращения его ротора остается неизменной. Изменяется только угол  $\theta$  между осями магнитных полей статора и ротора.

**Пуск в ход синхронного двигателя.** Синхронный двигатель не может быть запущен простым подключением к сети, так как вращающееся магнитное поле статора при этом перемещается с большой частотой относительно неподвижного ротора, и машина будет развивать знакопеременный момент со средним значением, равным нулю. Для пуска двигателя ему необходимо сообщить частоту вращения, близкую к синхронной. Это делают описанными ниже способами.

**Способ 1. Пуск с помощью разгонного двигателя.** Этот способ пуска состоит в том, что ротор синхронной машины разгоняют с помощью вспомогательного (разгонного) двигателя до частоты, близкой к синхронной (до «подсинхронной» частоты). После этого порядок действий по включению двигателя в сеть аналогичен порядку включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью методом самосинхронизации или точной синхронизации (см. подразд. 12.1). Затем разгонный двигатель отключают, и синхронная машина начинает работать в режиме двигателя. Мощность разгонного двигателя не превышает 10...20 % от номинальной мощности синхронного двигателя. Данный способ пуска применим только при условии пуска вхолостую, т. е. при отсутствии нагрузки на валу двигателя. В настоящее время пуск в ход при помощи разгонного двигателя на практике почти не применяется. Иногда таким способом разгоняют мощные синхронные компенсаторы (см. далее подразд. 13.2).

**Способ 2. Асинхронный пуск синхронного двигателя.** Для обеспечения возможности пуска при номинальной нагрузке двигатель снабжают пусковой обмоткой, состоящей

из стержней, заложенных в пазы, предусмотренные на полюсах ротора. Стержни соединены на торцах ротора кольцами (такую же конструкцию обмотку имеет демпферная обмотка синхронного генератора, см. подразд. 12.4).

При вращении магнитного поля статора относительно неподвижного ротора в пусковой обмотке, в обмотке возбуждения и во всех металлических частях ротора, пересекаемых линиями поля, индуцируются токи. В результате взаимодействия вращающегося магнитного поля с магнитными полями этих индуцированных токов появляется вращающий момент, под действием которого ротор приходит во вращение и постепенно увеличивает скорость. Другими словами, при асинхронном пуске синхронного двигателя используется принцип работы асинхронного двигателя (см. подразд. 9.1). Как только частота вращения ротора почти достигает синхронной частоты, обмотку возбуждения подключают к источнику постоянного тока, после чего ротор «втягивается в синхронизм», т. е. частота его вращения становится равной частоте вращения магнитного поля статора.

В явнополюсных машинах вхождению в синхронизм способствует свойственный им реактивный момент  $M_p$  (см. подразд. 12.3). Явнополюсные машины на холостом ходу или при небольшой нагрузке втягиваются в синхронизм даже до подключения обмотки возбуждения к источнику постоянного тока.

Асинхронный пуск синхронных двигателей мощностью до 50 кВт можно осуществить при отсутствии пусковой обмотки за счет токов, индуцированных в массивных частях ротора и в обмотке возбуждения, замкнутой на сопротивление пуска  $R_n$ .

Двигатели мощностью свыше 2 000 кВт изготавливают с массивным ротором, имеющим сплошные (не шихтованные) полюсные наконечники, соединенные по обеим сторонам ротора медными кольцами. Индуцированные в полюсных наконечниках токи создают асинхронный момент, достаточный для разгона двигателя. Если в таких мощных двигателях применить обычную пусковую обмотку (в виде стержней и торцевых колец), будет происходить сильный нагрев обмотки и нарушение ее механической прочности (разрушение паек и разрывы стержней).

Во время асинхронного пуска обмотка возбуждения синхронного двигателя должна быть отключена от источника тока. Однако ее нельзя оставлять разомкнутой, так как в ней будет индуцироваться большая ЭДС, на которую эта обмотка не рассчитана, что может вызвать пробой изоляции. Обмотку возбуждения нельзя также замыкать накоротко, поскольку при этом возникает большой ток, который

может привести к перегреву обмотки, а также вызвать явление *одноосного включения*, которое проявляется в том, что при пуске двигателя под нагрузкой ротор может достигнуть частоты вращения, примерно равной половине синхронной, и в синхронизм войти не сможет. Во избежание указанных явлений обмотка возбуждения должна быть замкнута на время пуска на сопротивление  $R_{\text{п}} = 7 \dots 12R_{\text{в}}$ , где  $R_{\text{в}}$  — сопротивление обмотки возбуждения.

**П р и м е ч а н и е.** Явление одноосного включения обусловлено тем, что в случае *несимметрии ротора*, которое имеет место при наличии пусковой обмотки и замкнутой накоротко обмотки возбуждения, кривая зависимости вращающего электромагнитного момента от частоты вращения имеет провал вблизи половины синхронной частоты. Этот провал можно объяснить, представляя вращающий момент в виде алгебраической суммы прямого и обратного моментов аналогично тому, как это делается при анализе работы однофазного асинхронного двигателя (см. подразд. 10.2).

**Рабочие характеристики синхронного двигателя.** Рабочие характеристики двигателя — это зависимости частоты вращения ротора  $n$ , тока якоря (статора)  $I_1$ , подводимой мощности  $P_1$ , полезного момента на валу  $M_2$  или вращающего электромагнитного момента  $M$ , развиваемого двигателем, коэффициента мощности  $\cos\varphi$  и коэффициента полезного действия  $\eta$  от полезной мощности двигателя (т. е. мощности на валу)  $P_2$  при постоянных значениях тока возбуждения, напряжения и частоты напряжения сети.

Рассмотрим особенности рабочих характеристик синхронного двигателя.

Во всех режимах работы частота вращения  $n$  синхронного двигателя остается постоянной при неизменной частоте тока сети. Поэтому характеристика  $n(P_2)$  представляет собой прямую, параллельную оси абсцисс.

Вращающий момент  $M$  двигателя при установившемся режиме работы равен статическому моменту  $M_{\text{ст}}$  на валу:  $M = M_{\text{ст}} = M_2 + M_0$ , где  $M_2$  — полезный момент;  $M_0$  — момент холостого хода (см. формулу (3.15)).

Момент  $M_0$  остается постоянным, а момент  $M_2$  изменяется строго пропорционально полезной мощности на валу:

$$M_2 = \frac{P_2}{\Omega} = \frac{60P_2}{2\pi n}, \quad (13.2)$$

где  $M_2$  измеряется в Н·м;  $\Omega$  — угловая скорость вращения ротора, рад/с.

Ввиду пропорциональности полезного момента и полезной мощности характеристика  $M_2(P_2)$  изображается прямой, проведенной из начала координат под определенным углом к оси абсцисс, а характеристика  $M(P_2)$  — прямой, параллельной характеристике  $M_2(P_2)$  и расположенной выше ее на значение  $M_0$ .

Вид зависимости коэффициента мощности  $\cos\varphi$  от нагрузки на валу двигателя определяется током возбуждения. Если значение  $\cos\varphi = 1$  установлено при холостом ходе, то при нагрузке  $\cos\varphi < 1$ . Регулируя ток возбуждения, можно установить  $\cos\varphi = 1$  при любой нагрузке.

Потребляемая мощность  $P_1$  растет быстрее, чем полезная мощность  $P_2$  на валу двигателя, поскольку при увеличении нагрузки увеличиваются электрические потери. Поэтому характеристика  $P_1(P_2)$  имеет вид не прямой линии, а кривой с постепенно увеличивающимся углом наклона касательной.

Ток статора  $I_1$  определяется следующим образом:

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} U \cos\varphi}. \quad (13.3)$$

Вид зависимости  $I_1(P_2)$  определяется характером изменения  $\cos\varphi$  при изменении нагрузки.

Характер зависимости КПД  $\eta$  двигателя от нагрузки одинаков для всех электрических машин. При изменении нагрузки от холостого хода до  $0,25P_{2ном}$  КПД быстро возрастает. При  $P_2 = 0,5P_{2ном}$  КПД достигает значения, близкого к номинальному. При дальнейшем повышении нагрузки КПД плавно снижается.

**Сравнение двигательного режима работы синхронной машины с генераторным.** Уравнения электромагнитной мощности и электромагнитного момента неявнополюсных и явнополюсных синхронных генераторов (12.3)...(12.8) справедливы также для синхронных двигателей с учетом того, что двигатель получает электромагнитную мощность из сети, в то время как генератор отдает ее. Электромагнитный момент является для двигателя вращающим, а для генератора — тормозным. Когда на валу двигателя увеличивается механическая нагрузка (т. е. когда увеличивается полезная механическая мощность  $P_2$  и полезный момент  $M_2$ ), ротор поворачивается относительно своего положения при холостом ходе против направления вращения и продолжает вращаться с прежней синхронной частотой  $n$  (с синхронной угловой скоростью  $\Omega$ ).

Для обоснования важного свойства синхронного двигателя — его способности работать с током, опережающим по фазе напряжение сети, — удобно вернуться к рассмотрению генератора, включенного

на параллельную работу с сетью. Ротор генератора вращается под действием первичного двигателя; устанавливают ток возбуждения генератора, при котором его ЭДС  $E_0$  равна напряжению сети  $U_c$ ; обеспечивают выполнение прочих условий включения генератора на параллельную работу с сетью (см. подразд. 12.1). В подразд. 12.2 отмечалось, что после правильного включения генератора на параллельную работу с сетью ток в обмотке якоря подключенного генератора равен нулю: он не отдает мощность в сеть и не получает ее из сети. Другими словами, синхронная машина работает в пограничном режиме, *не являясь ни генератором, ни двигателем*. Если в этом режиме увеличить ток возбуждения машины, то появится реактивный ток  $I_p$ , отстающий от ЭДС  $E_0$ , индуцируемой в ее якоре, на угол  $90^\circ$  и опережающий напряжение сети  $U_c$  на тот же угол (см. рис. 12.2, б). Поскольку режим работы машины является пограничным, то последнее утверждение относится как к генератору, так и к двигателю (при увеличении тока возбуждения активная составляющая тока не появляется; машина не отдает активную мощность в сеть, поэтому нельзя сказать, что она работает в режиме генератора). Если же ток возбуждения уменьшить, то реактивный ток будет отставать от напряжения сети (см. рис. 12.2, в).

Машина начнет работать в режиме генератора, если увеличить вращающий момент первичного двигателя (см. подразд. 12.2). При уменьшении же вращающего момента машина будет потреблять активный ток из сети, а не отдавать его в сеть, т. е. станет двигателем. Потребляемый активный ток отличается по фазе от отдаваемого тока на угол  $180^\circ$ . Это аналогично тому, что при переводе машины постоянного тока из генераторного в двигательный режим направление тока изменяется на противоположное (см. подразд. 2.6).

Обратимся к рис. 12.2, г, на котором представлены векторные диаграммы генератора, отдающего активную мощность в сеть, с которой он работает параллельно. При работе машины в качестве двигателя активная составляющая его тока  $I_a$ , в соответствии с изложенным ранее, будет противоположна по фазе напряжению на выводах этой машины  $U_1$  и совпадать по фазе с напряжением сети  $U_c$ . Пусть машина перевозбуждена, т. е. установлен ток возбуждения  $I_b$ , превышающий нормальный ток возбуждения  $I_{b, \text{норм}}$  (напомним, что нормальным считается такое возбуждение, при котором ток якоря имеет только активную составляющую). При перевозбуждении ток якоря будет содержать, помимо активной, реактивную составляющую  $I_p$ . Как выяснено ранее при рассмотрении рис. 12.2, б, эта реактивная составляющая будет опережать по фазе напряжение сети и отставать по фазе от напряжения синхронной машины. Если же

уменьшить ток возбуждения, появится отстающая по отношению к сети реактивная составляющая тока.

Итак, при переводе синхронной машины из генераторного в двигательный режим фаза активной составляющей его тока изменится на противоположную, а фаза реактивной составляющей остается неизменной. Поэтому ток якоря перевозбужденного двигателя, как и перевозбужденного генератора, опережает по фазе напряжение сети, а ток недо возбужденной машины в любом из двух режимов отстает от напряжения сети.

Когда машина переведена в режим двигателя, ее ротор будет продолжать вращаться при отключенном первичном двигателе.

**U-образные характеристики синхронного двигателя.** U-образные характеристики — это зависимости тока якоря (статора)  $I_1$  от тока возбуждения  $I_B$  при постоянной нагрузке на валу, постоянном напряжении и частоте напряжения сети (рис. 13.1).

Если при холостой работе или при заданной нагрузке синхронного двигателя установить нормальный ток возбуждения  $I_{B, \text{норм}}$ , при котором ток якоря имеет минимальное значение, то потребляемая двигателем мощность будет чисто активной, т. е.  $\cos\varphi = 1$ . При токе возбуждения, меньшем и большем нормального, ток якоря больше минимального.

Как отмечалось ранее, в случае перевозбуждения двигателя, т. е. при токе возбуждения, превышающем нормальный, ток якоря будет опережающим (емкостным) по отношению к напряжению сети, а при недо возбуждении — отстающим (индуктивным). Эта особенность синхронных двигателей используется для повышения коэффициента мощности электрических установок. Если параллельно группе асинхронных двигателей включить один или несколько синхронных двигателей, работающих с перевозбуждением, то созданная ими в сети емкостная составляющая тока будет частично или полно-

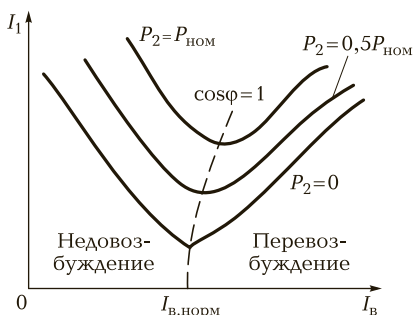


Рис. 13.1. U-образные характеристики синхронного двигателя



стью компенсировать индуктивную составляющую тока, обусловленную работой асинхронных двигателей. Тогда вся электрическая система будет работать с коэффициентом мощности  $\cos\varphi$ , близким к единице, что будет способствовать уменьшению потерь электроэнергии (см. также далее подразд. 13.2).

U-образные характеристики синхронного двигателя имеют тот же вид, что и у синхронного генератора, работающего параллельно с сетью (см. рис. 12.3), за исключением того, что U-образная кривая двигателя не может касаться оси абсцисс, так как наименьшей мощностью на валу двигателя является мощность холостого хода  $P_0$ , не равная нулю (имеется в виду, что первичный двигатель отсутствует).

## 13.2. СИНХРОННЫЙ КОМПЕНСАТОР

*Синхронный компенсатор* — это синхронный двигатель, предназначенный для повышения коэффициента мощности электрической сети.

Из курса электротехники известно, что повышение коэффициента мощности  $\cos\varphi$  электроустановок и целых предприятий до значений, близких к единице, необходимо для полного использования номинальной мощности генераторов и уменьшения тепловых потерь (если приемник энергии работает при неизменных напряжении и активной мощности, тогда ток в питающей линии будет тем больше, чем меньше коэффициент мощности приемника. При большем же токе больше и потери в проводах, а также в обмотке якоря питающего генератора). В большинстве случаев промышленные и бытовые приемники энергии потребляют ток, отстающей по фазе от напряжения питания (являются активно-индуктивными). Для компенсации индуктивной составляющей тока в ряде случаев параллельно приемнику включают конденсаторы. Однако при значительной потребляемой мощности необходимые конденсаторы оказываются слишком громоздкими и дорогостоящими, и для повышения коэффициента мощности экономически выгоднее включить в электрическую систему перевозбужденные синхронные двигатели, потребляющие опережающий ток (см. подразд. 3.1).

Синхронные компенсаторы выпускают на мощности от 1 до 160 МВ · А. Стандартом допускаются номинальные напряжения компенсаторов 6,6; 11 и 22 кВ. Исследования показали, что оптимальной для синхронного компенсатора является конструкция с явнополюсным ротором, имеющим шесть или восемь полюсов.

Применяют асинхронный пуск синхронного компенсатора (см. подразд. 13.1), поэтому на роторе помещают пусковую «беличью клетку». В отличие от двигателей, несущих механическую нагрузку, вал синхронного компенсатора, который такую функцию не выполняет, имеет уменьшенный диаметр, а подшипники устанавливают облегченной конструкции. Вал, не предназначенный для передачи вращающего момента, не выступает за пределы корпуса, поэтому синхронный компенсатор относительно легко герметизировать для применения водородного охлаждения (см. подразд. 11.8).

Синхронный компенсатор (СК) работает при нулевой активной мощности ( $P_{СК} = 0$ ), и его U-образная характеристика аналогична U-образной характеристике двигателя, построенной при том же условии (нижняя кривая на рис. 13.1). Рабочим участком характеристики синхронного компенсатора является ее правая половина, соответствующая перевозбуждению и опережающему (емкостному) току якоря. Ток возбуждения регулируется автоматическими устройствами.

Если в электрической системе преобладает емкостная составляющая тока, то в нее может быть включен синхронный компенсатор, работающий с недовозбуждением.

Коэффициент мощности электрической системы обычно не повышают более чем до 0,95. Дело в том, что для повышения коэффициента мощности требуется увеличение мощности синхронного компенсатора, и, начиная от некоторого значения  $\cos\varphi$ , экономический эффект от его повышения сводится к нулю.

Компенсатор следует устанавливать как можно ближе к потребителю, чтобы разгрузить от реактивного тока не только электростанцию, но и линию электропередачи.

Мощность синхронного компенсатора  $Q_{СК}$ , необходимая для повышения коэффициента мощности потребителя от значения  $\cos\varphi$  до значения  $\cos\varphi'$ , находят как разность значений реактивной мощности сети при этих двух коэффициентах мощности:  $Q_{СК} = Q - Q'$ . Мощности  $Q$  и  $Q'$  вычисляют по заданной полной мощности потребителя  $S$  и фазовым углам  $\varphi$  и  $\varphi'$ , найденным по коэффициентам мощности:  $Q = S \sin\varphi$ ;  $Q' = S \sin\varphi'$  (поскольку  $\cos\varphi'$  задается большим, чем  $\cos\varphi$ , то  $\sin\varphi' < \sin\varphi$  и  $Q' < Q$ ).

Полная мощность трехфазного потребителя выражается через линейное напряжение сети  $U_c$  и линейный ток  $I_c$  как  $S = \sqrt{3}U_c I_c$ . Тогда линейный ток до включения синхронного компенсатора

$$I_c = \frac{S}{\sqrt{3}U_c}. \text{ Активная составляющая этого тока } I_{c,a} = \frac{P}{\sqrt{3}U_c} = I_c \cos\varphi;$$

$$\text{реактивная составляющая } I_{c,p} = \frac{Q}{\sqrt{3}U_c} = I_c \sin\varphi.$$

После включения синхронного компенсатора активная составляющая тока сети не изменяется, поскольку компенсатор работает при нулевой активной мощности  $P_{СК} = 0$ . Реактивная же составляющая тока сети становится равной  $I'_{c,p} = \frac{Q'}{\sqrt{3}U_c}$ , т. е. уменьшается по сравнению со случаем отсутствия компенсатора.

Полный ток в сети, в которую включен компенсатор,  $I'_c = \sqrt{I_{c,a}^2 + (I'_{c,p})^2}$  также меньше, чем без компенсатора.

### 13.3. РЕАКТИВНЫЙ СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

*Трехфазный реактивный синхронный двигатель* имеет трехфазную обмотку якоря (статора) и ротор с явновыраженными полюсами, но без обмотки возбуждения. Принцип работы реактивного двигателя заключается в использовании реактивной электромагнитной мощности синхронной явнополюсной машины (второе слагаемое в уравнении (12.6)). Реактивная мощность определяет реактивный электромагнитный момент  $M_p$  (см. выражения (12.8)). Напомним, что указанные выражения справедливы для синхронной машины в любом режиме, но в генераторном режиме электромагнитный момент является тормозным, а в двигательном — вращающим. Из выражения  $M_p$  видно, что этот момент не равен нулю в случае неравенства синхронных индуктивных сопротивлений  $x_q$  и  $x_d$ , т. е. в явнополюсной машине. В реактивном двигателе момент  $M_p$  является практически единственной составляющей вращающего момента, поскольку основной момент  $M_{осн}$  незначителен: отсутствует ток возбуждения и, поэтому близка к нулю ЭДС  $E_0$  (остаточная ЭДС мала).

В реактивных двигателях применяют асинхронный пуск за счет токов в пусковой обмотке («беличьей клетке») или в массивных частях ротора. Поскольку реактивный момент существенно меньше вращающего момента обычного синхронного двигателя, нагрузка на валу при пуске не должна превышать 30 % номинальной, иначе может не произойти втягивание в синхронизм.

Широко распространены *однофазные реактивные двигатели* мощностью от единиц ватт до нескольких сотен ватт. Пуск таких двигателей осуществляется так же, как пуск однофазных (в том числе конденсаторных) асинхронных двигателей за счет вращающего магнитного поля, созданного рабочей и пусковой обмотками (см. подразд. 10.2).

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. В чем заключается принцип работы трехфазного синхронного двигателя? От чего зависит его частота вращения?
2. Почему синхронный двигатель не может быть приведен во вращение простым подключением к сети? Какие способы пуска синхронного двигателя вам известны?
3. Опишите и объясните вид рабочих характеристик синхронного двигателя.
4. Что показывают U-образные характеристики синхронного двигателя? Каковы их отличия от U-образных характеристик синхронного генератора? В каком случае ток якоря двигателя является опережающим по отношению к напряжению сети и в каком случае он является отстающим?
5. Каково назначение синхронного компенсатора? В чем состоят различия режимов работы и конструктивные различия синхронного двигателя и синхронного компенсатора?
6. В чем состоит конструктивная особенность реактивного синхронного двигателя? На чем основан принцип его работы?

## ДРУГИЕ ТИПЫ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### 14.1. АСИНХРОНИЗИРОВАННАЯ СИНХРОННАЯ МАШИНА

Конструкция *асинхронизированной синхронной машины*, которую называют также *машиной двойного питания*, подобна асинхронной машине с фазным ротором (см. подразд. 9.1). На ее статоре и роторе размещаются, как правило, трехфазные обмотки, имеющие раздельное питание.

Обмотка статора получает питание от сети с частотой напряжения  $f_1$ , а к обмотке ротора подводится напряжение с частотой  $f_2$ , меньшей частоты  $f_1$ . Для этого используется управляемый тиристорный преобразователь частоты (ПЧ) (рис. 14.1). Система управления регулирует как частоту, так и амплитуду напряжения на выходе ПЧ. За счет этого обеспечиваются несинхронные режимы работы. Асинхронизированные машины используются как в генераторном, так и в двигательном режиме.

При работе асинхронизированной машины в *двигательном режиме* частота тока ротора связана с частотой тока статора выражением (9.7)  $f_2 = sf_1$ , записанным ранее для асинхронного двигателя. Скольжение  $s$ , показывающее относительную разность частоты вращения магнитного поля статора  $n_1$  и частоты вращения ротора  $n$ , а также относительную разность частот тока статора и ротора, рас-

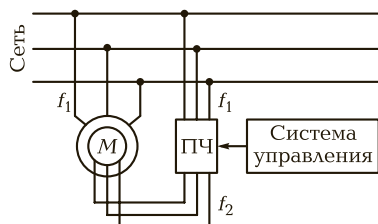


Рис. 14.1. Схема включения асинхронизированной синхронной машины

считывается согласно выражению  $s = \frac{n_1 - n}{n_1}$ , аналогичному выражению (9.2). Для различия асинхронной и асинхронизированной машин частота вращения ротора последней обозначена  $n$  вместо  $n_2$ . Напомним, что в асинхронной машине неравенство  $n_2 > n_1$  соответствует генераторному режиму (см. подразд. 9.9). В асинхронизированной машине частота вращения ротора может быть также меньше или больше частоты вращения поля статора. Частота вращения ротора изменяется при изменении частоты тока, задаваемой ПЧ, а также при изменении последовательности фаз ПЧ.

Получим связь частоты вращения ротора асинхронизированной машины с частотой вращения поля статора и частотами тока статора и ротора. Выразим частоту вращения ротора из выражения скольжения, записанного ранее. Непосредственно из этого выражения следует  $s = 1 - \frac{n}{n_1}$ , отсюда  $n = n_1(1 - s)$ . Поскольку скольжение, согласно выражению (9.7), связано с частотами тока как  $s = \frac{f_2}{f_1}$ , то  $n = n_1 \left(1 - \frac{f_2}{f_1}\right)$ , или  $n = n_1 \frac{f_1 - f_2}{f_1}$ . Имея в виду возможность изменения порядка чередования фаз ПЧ, обобщим это выражение следующим образом:

$$n = n_1 \frac{f_1 \mp f_2}{f_1}, \quad (14.1)$$

где знак минус соответствует прямому порядку чередования фаз ПЧ (т. е. совпадающему с чередованием фаз сети, питающей обмотку статора), а знак плюс — обратному порядку чередования фаз.

В первом случае частота вращения ротора меньше частоты вращения поля статора, во втором — больше. Например, если обмотка статора двигателя запитана напряжением с частотой 50 Гц, а обмотка ротора — напряжением с частотой 10 Гц, то частота вращения, в случае одной пары полюсов, может составлять 40 или 60 об/с (2 400 или 3 600 об/мин). Наконец, если частота тока ротора равна нулю (питание обмотки ротора постоянным током), то машина работает как обычный синхронный двигатель.

В обмотке ротора асинхронизированной синхронной машины, как и асинхронной машины, индуцируется ЭДС  $E_2$ . Если напряжение, подводимое к обмотке ротора от ПЧ, совпадает по фазе с ЭДС  $E_2$ , то при изменении этого напряжения будет происходить регулирование частоты вращения. Если же изменять фазу подводимого напряжения, то будет изменяться реактивная мощность машины, а значит, и коэффициент мощности  $\cos \varphi$ .

Главное преимущество асинхронизированной машины, работающей в энергосистеме в режиме генератора, по сравнению обычным синхронным генератором, заключается в *большей динамической устойчивости*, т. е. в ее способности более успешно противостоять выпадению из синхронизма (см. подразд. 12.4), в том числе в режиме потребления реактивной мощности. Названное преимущество особенно проявляется при значительной мощности. Вопрос об устойчивости работы генераторов остро встает в крупномасштабных энергосистемах, где нередки перепады напряжения, приводящие в отдельных случаях к серьезным авариям.

В России производство асинхронизированных машин освоено заводом «Электросила». Такие машины уже установлены на нескольких электростанциях в Москве и Подмосковье. Одна из важных задач, которые нужно решать при внедрении асинхронизированных машин — это создание эффективной системы управления, требующей использования современных быстродействующих компьютеров.

Приведем некоторые дополнительные примеры использования асинхронизированных машин.

Если ротор синхронного турбогенератора, имеющий одну пару полюсов, вращается от турбины с частотой 6 000 об/мин, то такой генератор вырабатывает ЭДС частотой 100 Гц (см. подразд. 11.2). Для получения промышленной частоты 50 Гц требуется преобразователь частоты. Однако если вместо обычного синхронного генератора установить асинхронизированную машину, на обмотку ротора которого подается трехфазное питание с обратным порядком чередования фаз, то при указанной частоте вращения обеспечивается частота вырабатываемой ЭДС 50 Гц (см. также подразд. 10.5).

Обратный пример: можно получить частоту вращения асинхронизированного двигателя 6000 об/мин, если на обмотку ротора подать напряжение сети с обратным чередованием фаз.

Асинхронизированные машины могут выполнять преобразование частоты напряжения между сетями 50 и 60 Гц. Для этого используются две соединенные валами одинаковые машины. Роторы обеих машин запитываются трехфазным напряжением частотой 5 Гц, но с разным чередованием фаз.

Перспективным является применение асинхронизированных машин для питания сетей с особо высокими требованиями к качеству электроэнергии. Эта проблема встает, в частности, при продаже энергии зарубежным потребителям.

Дальнейшее развитие машин этого типа — дело будущего.

## 14.2. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КОЛЛЕКТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

При рассмотрении вопроса реверсирования двигателя постоянного тока отмечалось, что изменение полярности источника питания не приводит к изменению направления вращения двигателя, поскольку при этом одновременно изменяется направления тока якоря и тока возбуждения (см. подразд. 3.5). Следовательно, если подключить двигатель постоянного тока последовательного или параллельного возбуждения к источнику переменного напряжения, то двигатель будет вращаться. Двигатели, предназначенные для работы от сетей постоянного и переменного напряжения, называются *универсальными коллекторными двигателями* и применяются в электроинструменте, швейных машинах, бормашинах, в вентиляторах, пылесосах, кофемолках, электробритвах, в других бытовых приборах, а также в качестве исполнительных двигателей в схемах автоматики. Преимущества этих двигателей перед асинхронными заключаются в том, что они позволяют экономично и плавно регулировать скорость вращения и могут работать с более высоким коэффициентом мощности. Универсальные двигатели дают возможность при питании от сети переменного тока получить весьма высокую скорость вращения — до 40 000 об/мин, чего невозможно добиться с помощью синхронных и асинхронных машин при частоте напряжения 50 Гц. Частота вращения универсальных коллекторных двигателей регулируется так же, как и двигателей постоянного тока последовательного возбуждения: изменением подводимого напряжения или шунтированием обмотки возбуждения (см. подразд. 3.7).

В магнитной цепи коллекторной машины при питании ее переменным током возникают значительные вихревые токи и, значит, велики тепловые потери. Для уменьшения вихревых токов станина и полюсы универсальной коллекторной машины должны быть выполнены шихтованными, т. е. набранными из изолированных листов электротехнической стали.

Условия коммутации в коллекторном двигателе при работе на переменном токе хуже, чем при работе на постоянном, что обусловлено пульсацией потока полюсов и возникновением вследствие этого так называемой *трансформаторной ЭДС*. Для уменьшения трансформаторной ЭДС следует уменьшить амплитуду магнитного потока. Чтобы при этом мощность двигателя осталась неизменной, нужно увеличить число полюсов.



Обмотка возбуждения в сети переменного тока обладает большим индуктивным сопротивлением. Особенно это относится к двигателю параллельного возбуждения, в котором обмотка возбуждения имеет большое число витков. В этом случае ток возбуждения будет значительно отставать по фазе от напряжения. В результате возникнет большой угол сдвига фаз между током якоря и током возбуждения, и тогда среднее значение вращающего момента окажется небольшим по сравнению со значением, определяемым уравнением (3.10). По этой причине универсальные коллекторные двигатели выполняют преимущественно с последовательным возбуждением, но и в этом случае для работы на переменном токе уменьшают число витков. Для этого на обмотке возбуждения предусматривают отпайку и к сети переменного тока включают только часть обмотки возбуждения (рис. 14.2).

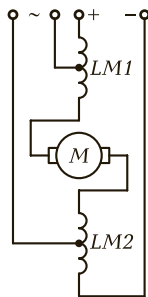


Рис. 14.2. Универсальный коллекторный двигатель

Характеристики универсального коллекторного двигателя при работе на переменном токе несколько хуже, чем на постоянном.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоят особенности конструкции и способа питания асинхронизированной синхронной машины?
2. Как связана частота вращения ротора асинхронизированной машины с частотой вращения поля статора и частотами тока статора и ротора? Каким образом регулируют частоту вращения ротора асинхронизированной машины?
3. Приведите примеры применения асинхронизированной синхронной машины.
4. Обоснуйте возможность работы коллекторного двигателя от сети переменного тока.
5. В чем заключаются преимущества и недостатки универсального коллекторного двигателя перед асинхронными и синхронными двигателями?
6. Назовите конструктивные отличия универсального коллекторного двигателя от коллекторного двигателя, предназначенного для работы только от сети постоянного тока. Чем обусловлены эти отличия?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Данилов И. А.* Общая электротехника с основами электроники / И. А. Данилов, П. М. Иванов. — М. : Высш. шк., 1998.
2. *Жерве Г. К.* Обмотки электрических машин / Г. К. Жерве. — Л. : Энергоатомиздат, 1989.
3. *Кацман М. М.* Электрические машины / М. М. Кацман. — М. : Издательский центр «Академия», 2014.
4. *Китаев В. Е.* Электрические машины / В. Е. Китаев, Ю. М. Корхов, В. К. Свирин. — М. : Высш. шк., 1978.
5. *Попов В. С.* Общая электротехника с основами электроники / В. С. Попов, С. А. Николаев. — М. : Энергия, 1977.
6. *Рожкова Л. Д.* Электрооборудование станций и подстанций / Л. Д. Рожкова, В. С. Козулин. — М. : Энергоатомиздат, 1987.
7. *Токарев Б. Ф.* Электрические машины / Б. Ф. Токарев. — М. : Энергоатомиздат, 1989.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	3
Введение .....	4

## РАЗДЕЛ I. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Глава 1. Общие вопросы .....	14
1.1. Принцип действия генератора постоянного тока .....	14
1.2. Конструкция машины постоянного тока .....	18
1.3. Общие сведения об обмотках якоря машины постоянного тока .....	23
1.4. Петлевые обмотки .....	25
1.5. Волновые обмотки и обмотка смешанного типа .....	31
1.6. Реакция якоря машины постоянного тока .....	35
1.7. Коммутация в машине постоянного тока .....	38
1.8. Способы улучшения коммутации .....	42
Глава 2. Генераторы постоянного тока .....	48
2.1. КПД и энергетическая диаграмма генератора постоянного тока .....	48
2.2. Электродвижущая сила генератора постоянного тока .....	51
2.3. Генератор постоянного тока независимого возбуждения .....	53
2.4. Генератор постоянного тока параллельного возбуждения. Самовозбуждение .....	60
2.5. Генераторы постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения .....	65
2.6. Параллельная работа генераторов постоянного тока .....	68
2.7. Специальные типы генераторов постоянного тока .....	71
Глава 3. Двигатели постоянного тока .....	76
3.1. Принцип действия электродвигателя постоянного тока .....	76
3.2. КПД и энергетическая диаграмма двигателя постоянного тока .....	80
3.3. Электромагнитный момент двигателя постоянного тока .....	82
3.4. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения .....	87
3.5. Реверсирование и регулирование частоты вращения двигателя параллельного возбуждения .....	94
3.6. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения .....	97
3.7. Двигатели постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения .....	101

3.8. Торможение двигателей постоянного тока .....	107
3.9. Специальные типы двигателей постоянного тока .....	110

## РАЗДЕЛ II. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Глава 4. Принцип действия и устройство трансформаторов .....	118
4.1. Назначение и принцип действия трансформаторов .....	118
4.2. Конструкции магнитопроводов и обмоток трансформаторов ....	122
Глава 5. Холостый ход, рабочий режим и короткое замыкание однофазных трансформаторов .....	128
5.1. Опыт холостого хода трансформатора .....	128
5.2. Работа трансформатора в режиме нагрузки .....	137
5.3. Опыт короткого замыкания трансформатора .....	143
5.4. Влияние параметров, определяемых в опытах короткого замыкания и холостого хода, на свойства трансформатора .....	147
Глава 6. Трехфазные трансформаторы и их параллельная работа .....	153
6.1. Конструкции силовых трехфазных трансформаторов .....	153
6.2. Испытание трехфазных трансформаторов и определение их параметров .....	159
6.3. Группы соединений обмоток трехфазных трансформаторов .....	161
6.4. Параллельная работа трехфазных трансформаторов .....	167
Глава 7. Специальные типы трансформаторов .....	172
7.1. Автотрансформаторы .....	172
7.2. Многообмоточные трансформаторы .....	174
7.3. Измерительные трансформаторы .....	175
7.4. Другие типы трансформаторов .....	178

## РАЗДЕЛ III. МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Глава 8. Общие вопросы .....	184
8.1. Вращающееся магнитное поле .....	184
8.2. Статор трехфазной машины .....	187
Глава 9. Трехфазные асинхронные машины с вращающимся ротором .....	197
9.1. Принцип работы и конструкция асинхронного двигателя .....	197
9.2. Уравнения асинхронного двигателя .....	202
9.3. Приведение параметров обмотки ротора к обмотке статора .....	205
9.4. КПД и потери энергии асинхронного двигателя .....	211
9.5. Механическая характеристика асинхронного двигателя .....	213
9.6. Рабочие характеристики асинхронного двигателя .....	217
9.7. Пуск асинхронного двигателя .....	219
9.8. Регулирование частоты вращения ротора асинхронного двигателя .....	225
9.9. Генераторный режим и способы электрического торможения асинхронного двигателя .....	231

Глава 10. Специальные типы асинхронных машин.....	236
10.1. Индукционный регулятор и фазорегулятор.....	236
10.2. Однофазный и конденсаторный асинхронные двигатели.....	239
10.3. Исполнительный асинхронный двигатель.....	243
10.4. Синхронная связь асинхронных машин.....	245
10.5. Асинхронный преобразователь частоты. Линейный асинхронный двигатель.....	248
Глава 11. Синхронные генераторы.....	252
11.1. Общие особенности конструкции и принцип действия синхронных генераторов.....	252
11.2. Типы синхронных генераторов.....	256
11.3. Реакция якоря синхронного генератора.....	262
11.4. Векторные диаграммы синхронных генераторов.....	268
11.5. Характеристики синхронного генератора.....	273
11.6. Определение параметров синхронного генератора.....	279
11.7. Возбуждение синхронных генераторов.....	283
11.8. Охлаждение синхронных генераторов.....	291
Глава 12. Параллельная работа синхронных генераторов.....	295
12.1. Включение синхронных генераторов на параллельную работу.....	295
12.2. Параллельная работа генератора с сетью.....	299
12.3. Электромагнитная мощность синхронного генератора.....	306
12.4. Устойчивость работы синхронного генератора.....	309
Глава 13. Синхронные двигатели и компенсаторы.....	314
13.1. Синхронный двигатель.....	314
13.2. Синхронный компенсатор.....	321
13.3. Реактивный синхронный двигатель.....	323
Глава 14. Другие типы машин переменного тока.....	325
14.1. Асинхронизированная синхронная машина.....	325
14.2. Универсальный коллекторный двигатель.....	328
Список литературы.....	330

*Учебное издание*

**Лобзин Сергей Анатольевич**

**Электрические машины**

**Учебник**

2-е издание, стереотипное

Редактор *Т. П. Манухина*

Технический редактор *Е. Ф. Коржуева*

Компьютерная верстка: *Н. В. Протасова*

Корректоры *Н. Л. Котелина, И. А. Ермакова*

Изд. № 702215078. Подписано в печать 17.02.2016. Формат 60×90/16.

Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 21,0.

ООО «Издательский центр «Академия». [www.academia-moscow.ru](http://www.academia-moscow.ru)  
129085, Москва, пр-т Мира, 101В, стр. 1.

Тел./факс: (495) 648-0507, 616-00-29.

Санитарно-эпидемиологическое заключение № РОСС RU. АЕ51. Н 16679 от 25.05.2015.