

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Серия основана в 2001 г.

М.М. КАЦМАН

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
МАШИНЫ
АВТОМАТИЧЕСКИХ
УСТРОЙСТВ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Допущено Министерством образования
Российской Федерации в качестве учебного
пособия для студентов учреждений среднего
профессионального образования, обучающихся
по специальности «Автоматизация
технологических процессов и производств»

Москва
ФОРУМ – ИНФРА-М
2002

listok

УДК 621.313(075.8)
ББК 31.261я73
К30

Рецензенты: доцент кафедры автоматизации и информационных технологий, к.т.н. *Ю.М. Келим* (Московский технический университет связи и информатики), преподаватель *Е.А. Лотерейчук* (Московский вечерний электромеханический техникум им. Л.Б. Красина)

Кацман М.М.

К30 Электрические машины автоматических устройств: Учеб. пособие для электротехнических специальностей техникумов. — М.: ФОРУМ, ИНФРА-М, 2002. — 264 с. — (Серия «Профессиональное образование»).

ISBN 5-8199-0027-8 (ФОРУМ)

ISBN 5-16-000831-4 (ИНФРА-М)

Учебное пособие написано в соответствии с государственным стандартом по специальности 2101 «Автоматизация технологических процессов и производств». Пособие содержит материал по устройству, принципу действия, физическим процессам работы, схемам включения и характеристикам трансформаторов, силовых двигателей и электромашинных элементов автоматики — исполнительных двигателей, электромашинных усилителей и преобразователей, тахогенераторов, машин синхронной связи, вращающихся трансформаторов.

Для учащихся электротехнических специальностей техникумов. Может быть полезно практическим работникам.

ББК 31.261я73

ISBN 5-8199-0027-8 (ФОРУМ) © М.М. Кацман, 2002

ISBN 5-16-000831-4 (ИНФРА-М) © «Издательский дом «ФОРУМ», 2002

Предисловие

В условиях роста технического уровня производств и внедрения комплексной автоматизации технологических процессов особую актуальность приобретают вопросы качественной подготовки специалистов непосредственно занятых в сфере эксплуатации и проектирования систем автоматики. В обширном комплексе электротехнических средств автоматики ведущее место занимают силовые электродвигатели и трансформаторы малой мощности, а также электромашинные элементы автоматики.

Книга предназначена для учащихся техникумов и колледжей — будущих специалистов в области автоматизации технологических процессов и производств и других областей, связанных с эксплуатацией и проектированием автоматических систем.

В книге рассмотрены принцип действия, устройство, особенности эксплуатации и конструкции электрических машин и трансформаторов малой мощности, получивших широкое применение для привода механизмов и устройств, применяемых на различных производствах, в электроинструменте, в бытовых приборах. Кроме того, значительное место в книге занимают вопросы электромашинных элементов, составляющих основу современных автоматических систем: исполнительные двигатели постоянного и переменного тока, электромашинные усилители, вращающиеся преобразователи, шаговые двигатели, информационные электрические машины (тахогенераторы, сельсины, магнесины, вращающиеся трансформаторы).

Цель данной книги — научить будущего специалиста обоснованно и правильно применять силовые электродвигатели для привода механизмов и устройств с учетом требуемой мощности, условий эксплуатации, а также выбирать электромашинные элементы автоматики в соответствии с их надежностью и точностью обработки электрических сигналов.

Учитывая специфику обучения в техникумах и колледжах, в книге уделено особое внимание рассмотрению физической сущности вопросов, связанных с изучением электрических машин и трансформаторов.

Автор выражает благодарность инженеру Туревскому И.С. за помощь при подготовке рукописи к изданию.

М.М. Кацман

Введение

■ В.1. Принцип действия и назначение электрических машин

Электрическая машина — это электромеханическое устройство, служащее для взаимного преобразования механической и электрической энергий. В основе такого преобразования лежат физические законы: закон электромагнитной индукции и закон электромагнитной силы.

Если проводник перемещать в магнитном поле, так чтобы он пересекал магнитные силовые линии, то в этом проводнике будет наводиться (индуцироваться) электродвижущая сила (ЭДС). Любая электрическая машина состоит из неподвижной части и подвижной (вращающейся). Одна из этих частей создает магнитное поле, а другая — несет на себе рабочую обмотку, представляющую собой систему проводников. Если к электрической машине подвести механическую энергию, т. е. вращать ее подвижную часть, то в соответствии с законом электромагнитной индукции в ее рабочей обмотке будет индуцироваться ЭДС. Если же к выводам этой обмотки подключить какой-либо потребитель электрической энергии, то в цепи возникнет электрический ток. В результате механическая энергия вращения будет преобразовываться в электрическую энергию. Электрические машины, осуществляющие такое преобразование называются *электрическими генераторами*. Электрические генераторы составляют основу электроэнергетики: их применяют на электростанциях, где они преобразуют механическую энергию турбин в электрическую энергию.

Закон электромагнитной силы состоит в том, что если в магнитное поле перпендикулярно магнитным силовым линиям поместить проводник и пропустить по нему электрический ток, то в результате взаимодействия тока с магнитным полем на проводник будет действовать механическая сила. Поэтому если рабочую обмотку электрической машины подключить к источнику электрической энергии, то в ней появится ток, а так как эта обмотка находится в магнитном поле, то на ее проводники будет действовать механические силы. Под действием этих сил подвижная часть электрической машины начнет вращаться. При этом электрическая энергия будет преобразовываться в механическую энергию. Электрические машины, осуществляющая такое преобразование, называются *электрическими двигателями*.

Электродвигатели широко используются в электроприводе станков, подъемных кранов, транспорта, бытовых приборов и т. д.

Электрические машины обладают свойством обратимости, т. е. любая электрическая машина может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Все зависит от вида подводимой к машине энергии. Однако обычно каждая электрическая машина имеет конкретное назначение: либо она генератор, либо двигатель.

Основой для создания электрических машин и трансформаторов был открыт М. Фарадеем закон электромагнитной индукции. Начало практического применения электрических машин было положено академиком Б. С. Якоби, который в 1834 г. создал конструкцию электрической машины, явившуюся прототипом современного электродвигателя. Практическое применение трансформаторов началось в 1876 г., когда русский ученый П. Н. Яблочков впервые применил трансформаторы для электропитания изобретенных им «электрических свечей» для освещения улиц Петербурга.

Широкому применению электрических машин в промышленном электроприводе способствовало изобретение русским инженером М. О. Доливо-Добровольским (1889 г.) трехфазного асинхронного двигателя, отличавшегося от применявшихся в то время электродвигателей простотой конструкции и высокой надежностью.

К началу XX века было создано большинство видов электрических машин, применяемых и в настоящее время.

■ В.2. Классификация электрических машин

Разделение электрических машин на генераторы и двигатели является принципиальным, так как это определяет направление преобразования энергий. Однако применение электрических машин более разнообразно и помимо генераторов и двигателей они используются в качестве преобразователей, усилителей, компенсаторов, информационных датчиков и т. д. Однако целесообразно классифицировать электрические машины не по назначению, а по *принципу действия*. Тем более, что именно такое разделение электрических машин положено в основу их изучения. Принцип действия электрической машины определяет ее устройство. Поэтому классификация по принципу действия является к тому же и разделением машин по конструкции.

В соответствии с этой классификацией электрические машины разделяются на коллекторные и бесколлекторные, последние разделяются на синхронные и асинхронные, кроме того они разделяются на однофазные и трехфазные и т. д. На рис. В.1 представлена диаграмма классификации электрических машин по принципу действия.

Помимо электрических машин в книге рассматриваются *трансформаторы*, которые хотя и не являются электрическими машинами,

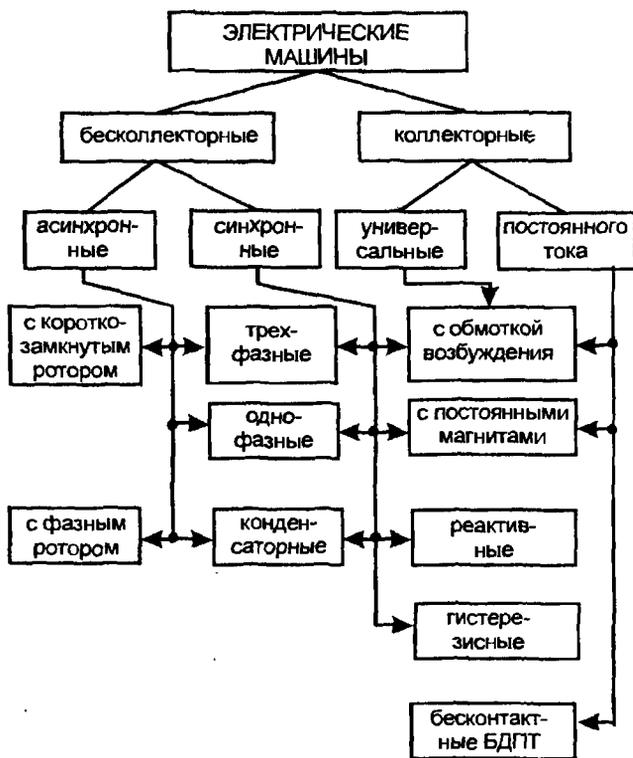


Рис. В.1. Диаграмма классификации электрических машин по принципу действия

но широко применяются в силовых электрических установках совместно с электрическими машинами. Отсутствие в трансформаторе вращающихся частей придает ему конструктивную форму, отличающую его от электрической машины. Однако процесс работы трансформаторов и электрических машин имеет много общего, так как в основу их принципа действия положена единая природа электромагнитных процессов.

Основное назначение трансформаторов — преобразование напряжения переменного тока. Но применение трансформаторов на практике более разнообразно в качестве специальных трансформаторных устройств: стабилизаторы, умножители частоты, преобразователи числа фаз переменного тока и т. п.

Электрические машины, применяемые в системах автоматики, телемеханики и вычислительной техники, наиболее разнообразны как по назначению, так и по конструкции. Их разделяют на две группы машин: силовые электродвигатели и электромашинные элементы автоматики.

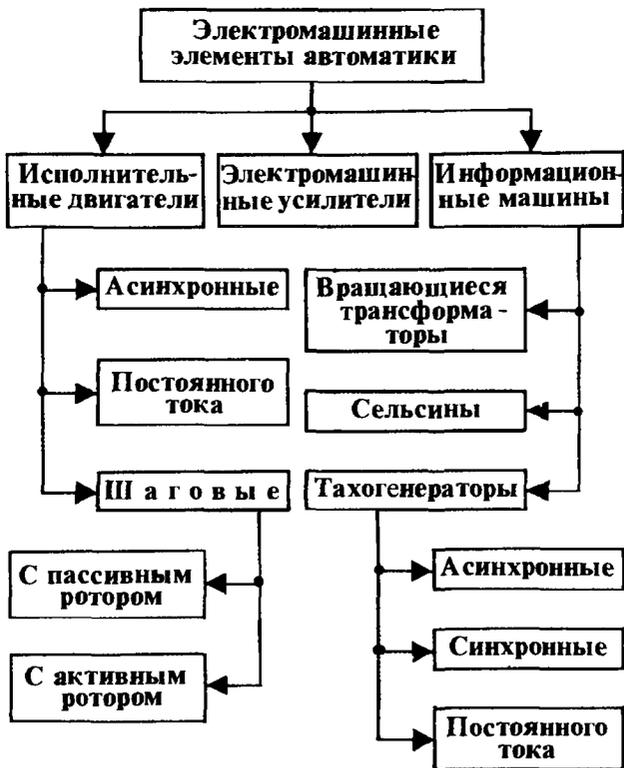


Рис. В.2. Диаграмма классификации электромашинных элементов автоматики

Силовые электродвигатели обычно не являются элементами автоматической системы, а лишь осуществляют привод какого-либо станка, механизма либо просто рабочего органа, входящего в сложную систему. При этом имеются ввиду электродвигатели сравнительно небольшой мощности (обычно мощностью не более 600 ватт), изготавливаемые сериями и имеющие широкое применение как в устройствах автоматики, так и в бытовых приборах, электроинструменте. По принципу действия эти электродвигатели разделяются на асинхронные, синхронные и коллекторные.

Электромашинные элементы автоматики составляют весьма разнообразную как по назначению, так и по конструктивному исполнению группу электрических машин. Основную часть электромашинных элементов составляют: исполнительные двигатели, электромашинные усилители, тахогенераторы, машины синхронной связи, вра-

щающиеся трансформаторы. В отличие от силовых электродвигателей они включены в автоматическую систему и реагируют на электрические сигналы и механические воздействия, возникающие в этой системе.

К электромашинным элементам автоматики предъявляются повышенные требования по надежности и точности воспроизведения поступающих сигналов, так как внезапный отказ или ошибка в обработке поступившего сигнала может нарушить работу всей автоматической системы. По этой причине электромашинные элементы автоматики изготавливают из высококачественных магнитных, проводниковых и изоляционных материалов с применением современных технологий.

На рис. В.2 представлена диаграмма классификации электромашинных элементов автоматики.

Раздел 1

Трансформаторы

Трансформаторы — это наиболее распространенные устройства в современной электротехнике. Трансформаторы большой мощности на напряжение до сотен киловольт составляют основу систем передачи электроэнергии от электростанций в линии электропередачи. Эти трансформаторы повышают напряжение переменного тока до значений, необходимых для экономичной передачи электроэнергии на значительные расстояния. В местах распределения электроэнергии между потребителями применяют трансформаторы, понижающие напряжение до требуемых для потребителей значений. Наряду с этим трансформаторы являются элементами электроприводов, нагревательных и других установок, где они осуществляют преобразование напряжения питающей сети до значений, необходимых для работы электродвигателей, нагревательных печей и других электроустройств.

В данном разделе рассматриваются силовые трансформаторы малой мощности для устройств автоматики, связи, сигнализации, приборной и измерительной техники при напряжении до 1000 В. Кроме того, в разделе рассмотрены специальные трансформаторные устройства: пик-трансформаторы, импульсные трансформаторы, удвоители и утроители частоты, ферромагнитные и феррорезонансные стабилизаторы напряжения.

Глава 1

Силовые трансформаторы

■ 1.1. Назначение и принцип действия трансформатора

Трансформатор — это электромагнитный статический преобразователь с двумя или более неподвижными обмотками, который преобразует параметры переменного тока: напряжение, ток, частоту, число фаз. Возможно также применение трансформаторов для преобразования синусоидального переменного тока в несинусоидальный.

Преимущественное применение в электрических установках получили *силовые трансформаторы*, преобразующие напряжение переменного тока при неизменной частоте. Трансформаторы для преобразования не только напряжения переменного тока, но и его частоты, числа фаз и т. д. называют *трансформаторными устройствами специального назначения*.

Силовые трансформаторы широко применяются в энергосистемах при передаче электроэнергии от электростанции к потребителям, а также в различных электроустановках для получения напряжений требуемой величины.

В настоящей главе рассматриваются силовые трансформаторы (для краткости мы их будем называть трансформаторами) небольшой мощности (не более нескольких киловольт-ампер), получившие наибольшее применение в блоках электропитания устройств автоматики, вычислительной техники, в измерительных приборах, связи.

Трансформаторы разделяются, в зависимости от:

— числа фаз преобразуемого напряжения, на *однофазные* и *многофазные* (обычно трехфазные);

— числа обмоток, приходящихся на одну фазу трансформируемого напряжения, на *двухобмоточные* и *многообмоточные*;

— способа охлаждения, на *сухие* (с воздушным охлаждением) *масляные* (погруженные в металлический бак, заполненный трансформаторным маслом).

Рассмотрим однофазный двухобмоточный трансформатор. Его принцип действия основан на явлении электромагнитной индукции. Однофазный двухобмоточный трансформатор состоит из замкнутого магнитопровода и двух обмоток. Одна из обмоток — первичная — подключается к источнику переменного тока с напряжением U_1 и частотой f (рис. 1.1). Переменный ток, проходящий по виткам этой об-

мотки, создает МДС, которая наводит в магнитопроводе трансформатора переменный магнитный поток Φ . Замыкаясь в магнитопроводе, этот поток сцепляется с витками обмоток трансформатора и индуцирует соответственно в первичной w_1 и вторичной w_2 обмотках ЭДС:

$$e_1 = -w_1 d\Phi/dt; \quad (1.1)$$

$$e_2 = -w_2 d\Phi/dt. \quad (1.2)$$

Если магнитный поток трансформатора — синусоидальная функция времени $\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega t$, изменяющаяся с угловой частотой $\omega = 2\pi f$, то после подстановки его в (1.1) и (1.2), дифференцирования и преобразования, получим действующие значения ЭДС первичной и вторичной обмоток:

$$E_1 = 4,44 f \omega_1 \Phi_{\max}; \quad (1.3)$$

$$E_2 = 4,44 f \omega_2 \Phi_{\max}. \quad (1.4)$$

В режиме холостого хода трансформатора, когда ток во вторичной обмотке отсутствует (обмотка разомкнута), напряжение на выводах вторичной обмотки равно ЭДС вторичной обмотки $E_2 = U_{20}$, а ЭДС первичной обмотки столь незначительно отличается от первичного напряжения, что этой разницей можно пренебречь: $E_1 \approx U_1$.

Отношение ЭДС обмотки высшего напряжения (ВН) к ЭДС обмотки низшего напряжения (НН) называют коэффициентом трансформации k . Для режима холостого хода трансформатора отношение указанных ЭДС практически равно отношению напряжений:

$$k = E_1/E_2 = w_1/w_2 \approx U_1/U_{20}. \quad (1.5)$$

Если $w_2 < w_1$ и $U_2 < U_1$, то трансформатор называется *понижающим*. Если $w_2 > w_1$ и $U_2 > U_1$, то трансформатор называется *повышающим*. Один и тот же трансформатор в зависимости от того, к какой из обмоток подводится напряжение, может быть понижающим или повышающим.

Если на выводы вторичной обмотки трансформатора подключить нагрузку сопротивлением Z_n , то в обмотке появится ток нагрузки I_2 . При этом мощность на выходе трансформатора определяется произведением вторичного напряжения U_2 на ток нагрузки I_2 . С некоторым приближением можно принять мощности на входе и выходе трансформатора одинаковыми, т. е. $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$. Из этого следует, что отношение токов в обмотках трансформатора обратно пропорционально отношению напряжений:

$$I_1/I_2 \approx U_2/U_1 \approx 1/k. \quad (1.6)$$

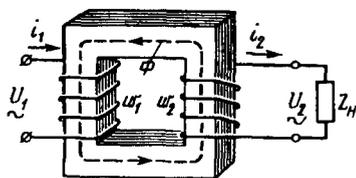


Рис. 1.1. Электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора

Таким образом, ток в обмотке низшего напряжения больше тока в обмотке высшего напряжения в k раз.

Если на выводы вторичной обмотки трансформатора подключить нагрузку сопротивлением r_n , то, так как мощности на входе $P_1 = I_1^2 r_n'$ и выходе $P_2 = I_2^2 r_n$ трансформатора приблизительно равны, из уравнения

$$I_1^2 r_n' \approx I_2^2 r_n \quad (1.7)$$

определим сопротивление нагрузки, измеренное на выводах первичной обмотки:

$$r_n' \approx r_n I_2^2 / I_1^2 \approx r_n k^2. \quad (1.8)$$

т. е. оно изменится в k^2 раз по сравнению с сопротивлением r_n .

Это свойство трансформаторов используется в межкаскадных трансформаторах для согласования входного сопротивления какого-либо каскада (блока) с выходным сопротивлением предыдущего каскада (блока).

Трансформатор является аппаратом переменного тока. Если первичную обмотку трансформатора включить в сеть постоянного тока, то магнитный поток в магнитопроводе этого трансформатора окажется постоянным как по величине, так и по направлению, т. е. $d\Phi/dt = 0$. Такой поток не будет индуцировать ЭДС в обмотках трансформатора, что исключит передачу электроэнергии из первичной цепи во вторичную. Кроме того, отсутствие ЭДС в первичной обмотке трансформатора приведет к возникновению в ней тока недопустимо большой величины, следствием чего будет выход из строя этого трансформатора.

■ 1.2. Устройство трансформаторов

Основные части трансформаторов — обмотки и магнитопровод. Магнитопровод состоит из стержней и ярм. На стержнях располагают обмотки, а ярма служат для соединения магнитопровода в замкнутую систему. Для изготовления магнитопроводов трансформаторов применяют тонколистовую электротехническую сталь. При частоте переменного тока 50 Гц применяют листы (полосы) толщиной 0,5 или 0,35 мм. При частотах 400 Гц и более применяют листы (полосы) толщиной 0,2—0,08 мм. При частотах 1000 Гц и выше магнитопроводы изготавливают из железоникелевых сплавов типа пермаллой, характеризующихся улучшенными по сравнению с электротехническими сталями свойствами: более высокой магнитной проницаемостью и меньшей коэрцитивной силой.

В зависимости от способа изготовления магнитопроводы трансформаторов бывают пластинчатые и ленточные. Магнитопроводы

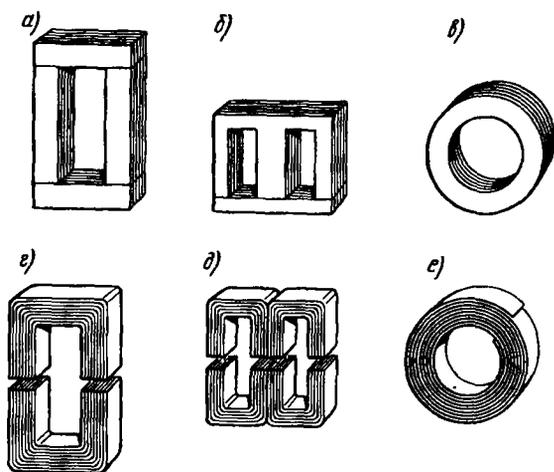


Рис. 1.2. Магнитопроводы трансформаторов

однофазных трансформаторов бывают трех основных видов: стержневые, броневые и тороидальные.

Пластинчатые магнитопроводы (рис. 1.2, а—в) собирают из отдельных пластин, полученных путем штамповки или резки листовой электротехнической стали. Для уменьшения вихревых токов пластины изолируют друг от друга слоем изоляционного лака или оксидной пленкой. Стержневые пластинчатые магнитопроводы (рис. 1.2, а) собирают из пластин (полос) прямоугольной формы. Пластины магнитопровода скрепляют в пакет либо посредством шпилек, электрически изолированных от пластин специальными втулками и шайбами, либо посредством банджа из стеклянной нетканой ленты или ниток. Броневые пластинчатые магнитопроводы (рис. 1.2, б) собирают из пластин Ш-образной формы. Они имеют лишь один стержень, на котором располагают все обмотки трансформатора. Тороидальные пластинчатые магнитопроводы (рис. 1.2, в) собирают из отдельных штампованных колец.

Ленточные разрезные магнитопроводы стержневого (рис. 1.2, г) и броневые (рис. 1.2, д) типов состоят из отдельных частей подковообразной формы. После установки заранее изготовленных обмоток эти подковообразные части соединяют встык и скрепляют стяжками. Тороидальные ленточные магнитопроводы (рис. 1.2, е) изготавливают путем навивки ленты. Преимущества таких магнитопроводов — отсутствие стыков, т. е. мест с повышенным магнитным сопротивлением.

Магнитопроводы броневые обеспечивают трансформаторам следующие достоинства: лучшее заполнение окна магнитопровода обмоточным проводом; частичную защиту обмотки ярмами от

ханических повреждений. Однако при бронеом магнитопроводе ухудшаются условия охлаждения обмоток.

Кроме обмоток и магнитопровода трансформаторы низкого напряжения имеют кожух, клеммную колодку и крепежные элементы. Металлический кожух соединяют с магнитопроводом и заземляют — мера, необходимая по условиям техники безопасности. Высоковольтные трансформаторы делают масляными — магнитопровод с обмотками помещают в металлический бак, заполненный трансформаторным маслом, которое увеличивает электрическую прочность изоляции обмоток и способствует лучшему охлаждению трансформатора.

■ 1.3. Основные соотношения в трансформаторе

При работе трансформатора с подключенной к зажимам вторичной обмотки нагрузкой Z_H (рис. 1.3, а) в его первичной обмотке проходит ток \dot{I}_1 , а во вторичной обмотке — ток \dot{I}_2 . Проходя по обмоткам, эти токи создают соответственно МДС первичной $\dot{F}_1 = \dot{I}_1 w_1$ и вторичной $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 w_2$ обмоток. Действуя совместно, МДС наводят в трансформаторе основной магнитный поток Φ , замыкающийся в магнитопроводе, и магнитные потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$, каждый из которых частично проходит через магнитопровод, а частично через воздушные промежутки и кожух трансформатора. Если основной поток Φ сцеплен с обеими обмотками трансформатора, то каждый из потоков рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ сцеплен соответственно лишь с одной из обмоток w_1, w_2 .

Основной магнитный поток Φ индуцирует в обмотке w_1 ЭДС E_1 [см. (1.3)], в обмотке w_2 ЭДС E_2 [см. (1.4)]. Каждый из магнитных потоков рассеяния индуцирует ЭДС рассеяния только в одной из обмоток: поток $\Phi_{\sigma 1}$ в обмотке w_1 ЭДС рассеяния $E_{\sigma 1}$, поток $\Phi_{\sigma 2}$ в обмотке w_2 ЭДС рассеяния $E_{\sigma 2}$. Магнитные потоки рассеяния пропорциональны токам соответствующих обмоток, а ЭДС рассеяния эквива-

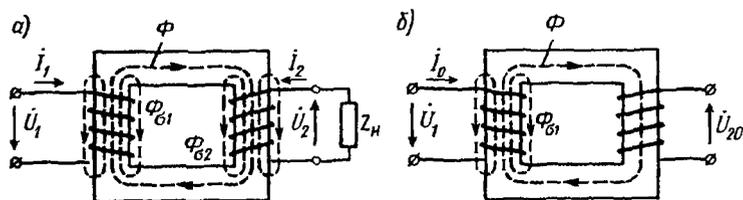


Рис. 1.3. Схемы однофазного трансформатора в режимах нагрузки (а) и холостого хода (б)

лентны падениям напряжения на индуктивных сопротивлениях рассеяния первичной и вторичной обмоток соответственно:

$$x_1 = E_{\sigma 1} / I_1; \quad (1.9)$$

$$x_2 = E_{\sigma 2} / I_2. \quad (1.10)$$

Учитывая, что каждая из обмоток трансформатора обладает активным сопротивлением r_1 или r_2 , запишем уравнения напряжений по второму закону Кирхгофа в комплексном виде:

для первичной цепи

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 = \dot{I}_1(r_1 + jx_1), \quad (1.11)$$

или

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1x_1 + \dot{I}_1r_1; \quad (1.12)$$

для вторичной цепи

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2(r_2 + jx_2), \quad (1.13)$$

или

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2x_2 - \dot{I}_2r_2. \quad (1.14)$$

Полученные выражения (1.12) и (1.14) представляют собой уравнения напряжений первичной и вторичной цепей трансформатора.

Рассмотрим работу трансформатора без нагрузки, т. е. в режиме холостого хода (рис. 1.3, б), когда ток во вторичной цепи $I_2 = 0$, а ток в первичной цепи представляет собой ток холостого хода I_0 . В этом режиме основной магнитный поток трансформатора Φ создается лишь МДС первичной обмотки, а амплитудное значение этого потока

$$\Phi_{\max} = \sqrt{2}I_0 w_1 / R_M, \quad (1.15)$$

где R_M — магнитное сопротивление магнитопровода потоку Φ_{\max} .

Если же трансформатор работает с подключенной нагрузкой Z_H (см. рис. 1.3, а) и основной магнитный поток создается совместным действием МДС первичной $\dot{F}_1 = \dot{I}_1w_1$ и вторичной $\dot{F}_2 = \dot{I}_2w_2$ обмоток, то амплитудное значение основного магнитного потока запишем в виде:

$$\Phi_{\max} = \sqrt{2}(\dot{I}_1w_1 + \dot{I}_2w_2) / R_M. \quad (1.16)$$

Преобразовав (1.3), получим еще одну формулу для основного магнитного потока:

$$\Phi_{\max} = E_1 / (4,44 f w_1). \quad (1.17)$$

Пренебрегая значением падения напряжения в первичной обмотке $I_1(r_1 + jx_1)$, которое обычно не превышает нескольких процентов от первичного напряжения, т. е. приняв $E_1 \approx U_1$, получим

$$\Phi_{\max} \approx U_1 / (4,44 f w_1). \quad (1.18)$$

Из (1.18) следует, что основной магнитный поток не зависит от нагрузки трансформатора, это позволяет приравнять выражения (1.15), (1.16) и получить *уравнение МДС трансформатора*

$$\dot{I}_0 w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2. \quad (1.19)$$

Из уравнения (1.19) следует, что сумма МДС первичной $\dot{I}_1 w_1$ и вторичной $\dot{I}_2 w_2$ обмоток в режиме работы трансформатора под нагрузкой равна МДС холостого хода $\dot{I}_0 w_1$, необходимой для наведения в магнитопроводе трансформатора основного магнитного потока Φ_{\max} .

Такое взаимодействие МДС $\dot{I}_1 w_1$ и $\dot{I}_2 w_2$ объясняется их встречным направлением, т. е. если МДС $\dot{I}_1 w_1$ оказывает на магнитопровод намагничивающее действие, то МДС $\dot{I}_2 w_2$ стремится размагнитить этот магнитопровод. Несмотря на такое взаимодействие указанных МДС, магнитный поток в магнитопроводе Φ_{\max} в процессе работы трансформатора остается практически неизменным, так как во всем диапазоне изменений тока нагрузки I_2 (в пределах номинального значения) МДС первичной обмотки $\dot{I}_1 w_1$ оказывается больше, чем МДС вторичной обмотки $\dot{I}_2 w_2$, на величину МДС холостого хода $\dot{I}_0 w_1$.

Для объяснения этого явления рассмотрим *уравнение токов трансформатора*, которое получим из (1.19), разделив его обе части на число витков w_1 .

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} \quad (1.20)$$

или

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2), \quad (1.21)$$

где $\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 w_2 / w_1$ — ток вторичной обмотки трансформатора, приведенный к числу витков первичной обмотки w_1 , т. е. ток, который в обмотке с числом витков w_1 создает такую же магнитодвижущую силу, как и ток \dot{I}_2 во вторичной обмотке w_2 . Таким образом, $\dot{I}'_2 w_1 = \dot{I}_2 w_2$.

Из уравнения токов трансформатора (1.21) следует, что ток первичной обмотки \dot{I}_1 представляет собой сумму двух составляющих, одна из которых \dot{I}_0 создает МДС $\dot{I}_0 w_1$, необходимую для наведения в магнитопроводе основного магнитного потока Φ_{\max} , а другая — \dot{I}'_2 создает МДС $\dot{I}'_2 w_1$, компенсирующую размагничивающее действие МДС вторичной обмотки $\dot{I}_2 w_2$.

Этим объясняется тот факт, что любое изменение тока I_2 во вторичной цепи трансформатора вызывает соответствующее изменение тока I_1 в первичной обмотке.

1.4. Потери и КПД трансформатора

В процессе работы трансформатора под нагрузкой часть активной мощности P_1 , поступающей в первичную обмотку из сети, рассеивается в трансформаторе на покрытие потерь. В итоге активная мощность P_2 , поступающая в нагрузку, оказывается меньше мощности P_1 на величину суммарных потерь в трансформаторе ΣP :

$$P_1 = P_2 + \Sigma P. \quad (1.22)$$

В трансформаторе есть два вида потерь — магнитные и электрические.

Магнитные потери P_M в стальном магнитопроводе, по которому замыкается переменный магнитный поток Φ_{\max} , складываются из потерь на гистерезис P_H , вихревые токи $P_{\text{вх}}$:

$$P_M = P_H + P_{\text{вх}}. \quad (1.23)$$

Магнитные потери прямо пропорциональны массе магнитопровода и квадрату магнитной индукции в нем. Они также зависят от свойств стали, из которой изготовлен магнитопровод. Уменьшению потерь на гистерезис способствует изготовление магнитопровода из ферромагнитных материалов (электротехнической стали или сплава типа пермаллой), обладающих небольшой коэрцитивной силой (узкой петлей гистерезиса). Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопровод изготавливают шихтованным (из тонких пластин текстурованной электротехнической стали, изолированных друг от друга тонким слоем лака или оксидной пленкой) или витым из стальной ленты. Магнитные потери зависят также и от частоты переменного тока: с увеличением частоты f магнитные потери возрастают за счет потерь на гистерезис P_H и вихревые токи $P_{\text{вх}}$.

Ранее было установлено, что основной магнитный поток в магнитопроводе не зависит от нагрузки трансформатора [см. (1.17)], поэтому при изменениях нагрузки магнитные потери остаются практически неизменными.

Электрические потери — это потери в обмотках трансформатора, обусловленные нагревом обмоток токами, проходящими по ним.

$$P_3 = P_{31} + P_{32} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2. \quad (1.24)$$

Электрические потери являются переменными, так как их вели-

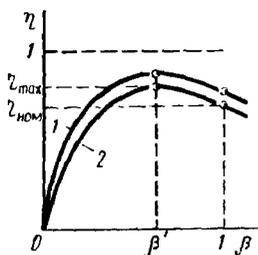


Рис. 1.4. Зависимость $\eta = f(\beta)$ при $\cos \varphi_2 = 0$ (график 1) и $\cos \varphi_2 < 1$ (график 2)

чина пропорциональна квадрату токов в обмотках. Электрические потери при любом токе нагрузки I_2 трансформатора, Вт,

$$P_3 = P_{3\text{ ном}} \beta^2, \quad (1.25)$$

где $P_{3\text{ ном}}$ — электрические потери при номинальном токе нагрузки; $\beta = I_2/I_{2\text{ ном}}$ — коэффициент нагрузки, характеризует степень нагрузки трансформатора.

Коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора представляет собой отношение активных мощностей на его выходе P_2 и входе P_1 :

$$\eta = P_2/P_1 = P_2/(P_2 + P_m + P_3). \quad (1.26)$$

Активная мощность на выходе трансформатора, Вт,

$$P_2 = S_{\text{ ном}} \beta \cos \varphi_2, \quad (1.27)$$

где $S_{\text{ ном}}$ — номинальная мощность трансформатора, В · А; $\cos \varphi_2$ — коэффициент мощности нагрузки.

Учитывая (1.25), (1.26) и (1.27), получим формулу КПД трансформатора, удобную для практических расчетов:

$$\eta = \frac{S_{\text{ ном}} \beta \cos \varphi_2}{S_{\text{ ном}} \beta \cos \varphi_2 + P_m + P_{3\text{ ном}} \beta^2}. \quad (1.28)$$

Таким образом, КПД трансформаторов зависит от величины нагрузки β и от ее характера $\cos \varphi_2$. Графически эта зависимость представлена на рис. 1.4. Максимальное значение КПД η_{\max} соответствует нагрузке β' , при которой электрические потери равны магнитным ($P_{3\text{ ном}} \beta'^2 = P_m$).

Номинальное значение КПД $\eta_{\text{ ном}}$ тем выше, чем больше номинальная мощность трансформатора $S_{\text{ ном}}$. Например,

$$\begin{aligned} \eta_{\text{ ном}} &= 0,70 \div 0,85 \text{ при } S_{\text{ ном}} \leq 100 \text{ В} \cdot \text{А} \\ \text{и } \eta_{\text{ ном}} &= 0,90 \div 0,95 \text{ при } S_{\text{ ном}} \leq 10 \text{ кВ} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

У более мощных трансформаторов КПД может достигать $\eta_{\text{ ном}} = 0,98 \div 0,99$.

1.5. Опыты холостого хода и короткого замыкания трансформаторов

Опыт холостого хода проводят в следующем порядке: первичную обмотку включают в сеть на номинальное напряжение, а вторич-

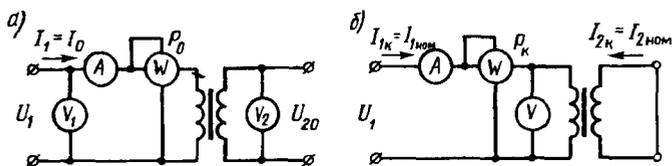


Рис. 1.5. Схемы включения однофазных трансформаторов при опытах холостого хода (а) и короткого замыкания (б)

ную обмотку оставляют разомкнутой. При этом ток в первичной обмотке I_0 , а во вторичной обмотке $I_2 = 0$ (рис. 1.5, а).

Амперметр A в первичной цепи дает возможность определить ток холостого хода I_0 , который принято измерять в процентах от номинального тока $I_{1\text{ном}}$ в первичной обмотке:

$$i_0 = (I_0 / I_{1\text{ном}}) 100. \quad (1.29)$$

В трансформаторах большой и средней мощности $i_0 = (2 \div 10)\%$, а в трансформаторах малой мощности (менее $200\text{—}300 \text{ В} \cdot \text{А}$) может достигать 40% и более.

Ток холостого хода I_0 наряду с реактивной составляющей I_{0p} , которая наводит в магнитопроводе основной магнитный поток, имеет активную составляющую I_{0a} , которая обусловлена магнитными потерями в магнитопроводе трансформатора. Применение качественных электротехнических сталей с небольшими удельными магнитными потерями способствует уменьшению активной составляющей тока холостого хода до значения, не превышающего 10% , т. е. $I_{0a} \leq 0,1 I_0$.
Результирующий ток холостого хода, А,

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}. \quad (1.30)$$

Если ток холостого хода I_0 , полученный опытным путем, намного превышает значение, указанное в каталоге на исследуемый тип трансформатора, то это свидетельствует о неисправности трансформатора: наличии короткозамкнутых витков в обмотках; нарушении электрической изоляции между некоторыми пластинами (полосами) магнитопровода.

При опыте холостого хода $U_{20} = E_2$ и $U_1 \approx E_1$, поэтому, используя показания вольтметров V_1 и V_2 , можно с достаточной точностью определить коэффициент трансформации $k = U_1 / U_{20}$.

Ваттметром W в первичной цепи трансформатора измеряют мощность P_0 , потребляемую трансформатором в режиме холостого хода. В трансформаторах мощности более $200\text{—}300 \text{ В} \cdot \text{А}$ электрические потери в первичной обмотке вследствие небольшой величины тока I_0 весьма малы, поэтому считаем мощность холостого хода равной магнитным потерям, т. е. $P_0 = P_m$ (см. § 1.4).

Опыт короткого замыкания выполняют следующим образом. Вторичную обмотку трансформатора замыкают накоротко (рис. 1.5, б), а к первичной обмотке подвоз пониженное напряжение короткого замыкания $U_1 = U_k$, при котором ток короткого замыкания в первичной обмотке равен номинальному значению, т. е. $I_{1k} = I_{1\text{ном}}$. Напряжение короткого замыкания принято выражать в процентах от номинального напряжения $U_{1\text{ном}}$:

$$u_k = (U_k / U_{1\text{ном}}) 100. \quad (1.31)$$

Обычно $u_k = (5 \div 12)\%$.

Магнитный поток $\Phi_{\text{маг}}$ пропорционален напряжению U_1 [см. (1.18)], но так как напряжение короткого замыкания не превышает 5—12% от $U_{1\text{ном}}$, то для создания основного магнитного потока при опыте короткого замыкания требуется настолько малая величина намагничивающего тока, что ею можно пренебречь. Исходя из этого, принято считать магнитные потери при опыте короткого замыкания равными нулю, а потребляемую мощность короткого замыкания P_k равной мощности электрических потерь трансформатора (см. § 1.4) при номинальной нагрузке трансформатора ($P_k = P_{\Sigma\text{ном}}$).

Коэффициент мощности при опыте короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = P_k / (U_k I_{1\text{ном}}). \quad (1.32)$$

Таким образом, опыты холостого хода и короткого замыкания дают возможность экспериментально найти ряд важных параметров трансформатора: I_0 , $P_0 = P_M$, u_k , $P_k = P_{\Sigma\text{ном}}$, используя которые по (1.28) можно определить КПД трансформатора.

■ 1.6. Изменение вторичного напряжения трансформатора

Из уравнения напряжений для вторичной обмотки трансформатора (1.14) следует, что с изменением тока нагрузки I_2 напряжение на выходе трансформатора U_2 также изменяется, что обусловлено главным образом изменениями падений напряжения jI_2x_2 и I_2r_2 . Изменение вторичного напряжения U_2 при переходе трансформатора от режима холостого хода к режиму нагрузки выражают в процентах от номинального напряжения, за которое в трансформаторе принимают напряжение холостого хода U_{20} :

$$\Delta U_{\%} = \frac{(U_{20} - U_2) 100}{U_{20}}. \quad (1.33)$$

С точностью, достаточной для практических расчетов, $\Delta U_{\%}$

представим в виде

$$\Delta U_{\%} = \beta(u_{ka} \cos \varphi_k + u_{kp} \sin \varphi_2), \quad (1.34)$$

где $u_{ka} = u_k \cos \varphi_k$ — активная составляющая напряжения короткого замыкания; $u_{kp} = u_k \sin \varphi_k$ — реактивная составляющая напряжения короткого замыкания; φ_2 — угол сдвига фаз между током нагрузки I_2 и напряжением U_2 .

Изменение вторичного напряжения [см. (1.34)] зависит не только от величины нагрузки β , но и от ее характера т. е. коэффициента мощности $\cos \varphi_2$.

Зависимость напряжения на выходе трансформатора от тока нагрузки $U_2 = f(I_2)$, представленная графически, называется *внешней характеристикой* трансформатора (рис. 1.6). Для построения этой характеристики воспользуемся формулой

$$U_{2*} = 1 - 10^{-2} \Delta U_{\%}, \quad (1.35)$$

или с учетом (1.34)

$$U_{2*} = 1 - \beta \cdot 10^{-2} (u_{ka} \cos \varphi_2 + u_{kp} \sin \varphi_2), \quad (1.36)$$

где $U_{2*} = U_2 / U_{20}$ — напряжение на выходе трансформатора в относительных единицах.

При изменениях нагрузки в пределах номинальной ($\beta \leq 1$) внешние характеристики трансформатора прямолинейны.

При чисто активной нагрузке ($\cos \varphi_2 = 1$) внешняя характеристика слабо наклонена к оси абсцисс, при активно-реактивной нагрузке ($\cos \varphi_2 < 1$) наклон внешней характеристики увеличивается.

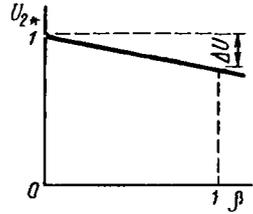


Рис. 1.6. Внешняя характеристика трансформатора

■ 1.7. Трехфазные и многообмоточные трансформаторы

Трансформирование трехфазного тока можно осуществить тремя однофазными трансформаторами, соединенными в трансформаторную группу (рис. 1.7, а). Однако чаще для этой цели применяют трехфазные трансформаторы (рис. 1.7, б), состоящие из трехстержневого магнитопровода, на каждом стержне которого располагают первичную и вторичную обмотки одной фазы.

Рассмотренные ранее уравнения напряжений и токов, а также расчетные формулы можно применять для одной фазы трехфазного трансформатора.

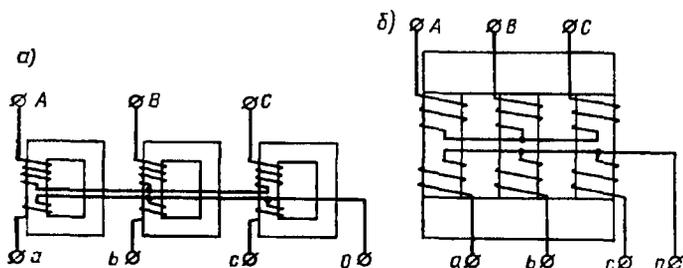


Рис. 1.7. Трансформаторная группа (а) и трехфазный трехстержневой трансформатор (б)

Обозначения выводов обмоток трансформаторов приведены в табл. 1.1.

Обмотки трехфазных трансформаторов могут быть соединены звездой Y или треугольником Δ , при этом схемы соединения обмоток обозначают дробью, указывая в числителе схему соединения обмоток высшего напряжения (ВН), а в знаменателе — обмоток низшего напряжения (НН). При соединении обмоток в звезду линейное напряжение U_n больше фазного в $\sqrt{3}$ раз, т. е. $U_n = \sqrt{3}U_\phi$, а при соединении в треугольник $U_n = U_\phi$.

Таблица 1.1

Тип трансформатора	Обмотки ВН			Обмотки НН		
	начало	конец	нейтраль	начало	конец	нейтраль
Однофазный	A	X	—	a	x	—
Трехфазный	A, B, C	X, Y, Z	0	a, b, c	x, y, z	0

Следовательно, отношение линейных напряжений (коэффициент трансформации линейных напряжений) в трехфазном трансформаторе определяется не только отношением числа витков обмоток каждой фазы, но и схемой их соединения, как показано ниже:

Схемы соединения обмоток	Y/Y	Δ/Y	Δ/Δ	Y/Δ
Коэффициент трансформации линейных напряжений k_n	$\frac{w_1}{w_2}$	$\frac{w_1}{\sqrt{3}w_2}$	$\frac{w_1}{w_2}$	$\frac{\sqrt{3}w_1}{w_2}$

При соединении вторичных обмоток трехфазного трансформатора в звезду вывод нулевой точки обычно располагают на клеммной панели, что дает возможность получить на выходе трансформатора не только линейное, но и фазное напряжение.

Многообмоточный трансформатор имеет одну первичную и несколько вторичных обмоток, рассчитанных на разные напряжения.

Мощность первичной обмотки определяется исходя из суммарной мощности вторичных обмоток. Силовые многообмоточные трансформаторы малой мощности применяются в источниках питания устройств автоматики, приборов, радио и связи. Такие трансформаторы мощностью от единиц до десятков вольт-ампер изготавливаются на частоту переменного тока от 50 до 2000 Гц. Многообмоточные трансформаторы на частоту 50 Гц изготавливаются мощностью до нескольких киловольт-ампер.

На рис. 1.8 показана принципиальная схема многообмоточного трансформатора малой мощности для источника питания электронного блока. Первичная обмотка этого трансформатора разделена на две части, каждая из которых имеет выводы 1, 3 и 2, 4, что позволяет включить трансформатор в сеть с напряжением 127 или 220 В. При включении в сеть на напряжение 127 В клеммы 1 и 2, а также 3 и 4 соединяют попарно. При этом обе части обмотки оказываются включенными параллельно. Если же в сети напряжение 220 В, соединяют клеммы 2 и 3, при этом части обмотки оказываются соединенными последовательно. Для ослабления помех, проникающих из сети во вторичные обмотки трансформатора, между первичной и вторичными обмотками помещают экранирующую обмотку, один конец которой заземлен. Один многообмоточный трансформатор заменяет несколько двухобмоточных, при этом он дешевле и легче последних.

Отечественная промышленность выпускает большое количество различных понижающих трансформаторов малой мощности, предназначенных для питания пониженным напряжением электрических цепей управления и сигнализации, выпрямительных установок и т. п. Например, широко применяются понижающие трансформаторы серии ОСМ (однофазные сухие многоцелевого назначения) мощностью от 0,063 до 4,0 кВ · А, предназначенные для питания цепей управления, местного освещения и сигнализации станков, электроинструмента и устройств автоматики. Трансформаторы изготовлены на витых разрезных сердечниках и рассчитаны для включения в сеть частотой 50 Гц.

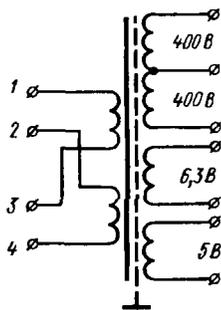


Рис. 1.8. Принципиальная схема силового многообмоточного трансформатора

■ 1.8. Трансформаторы для выпрямительных устройств

Основной элемент выпрямительного устройства — силовой трансформатор. Особенность работы такого трансформатора обусловлена наличием в его вторичной цепи диодов — полупроводни-

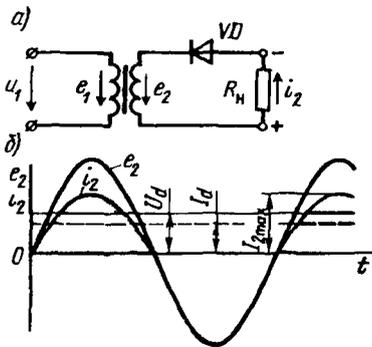


Рис. 1.9. Схема силового трансформатора и графики ЭДС и тока при однофазном однополупериодном выпрямлении

ковых элементов, обладающих односторонней проводимостью.

Рассмотрим работу однофазного трансформатора в однополупериодном выпрямителе (рис. 1.9, а). Ток i_2 во вторичной обмотке этого трансформатора создается только положительными полуволнами вторичной ЭДС e_2 и поэтому является пульсирующим, т. е. несинусоидальным (рис. 1.9, б). Этот несинусоидальный ток можно разложить в гармонический ряд, т. е. представить в виде суммы постоянного и переменных синусоидальных токов с угловыми частотами ω , 2ω , 4ω и т. д.:

$$i_2 = (I_{2\max}/\pi) + (I_{2\max}/2)\sin \omega t - (2I_{2\max}/3\pi)\cos 2\omega t - [2I_{2\max}/(3 \cdot 5\pi)]\cos 4\omega t, \quad (1.37)$$

где $I_{2\max}$ — амплитудное значение тока i_2 .
Первое слагаемое этого ряда

$$I_d = I_{2\max}/\pi \quad (1.38)$$

— постоянная составляющая выпрямленного тока. Второе слагаемое

$$i_{2\text{осн}} = 0,5I_{2\max} \sin \omega t \quad (1.39)$$

— переменный ток основной (первой) гармоники, частота которого равна угловой частоте тока сети ω . Оставшиеся слагаемые гармонического ряда являются высшими гармониками вторичного тока, поскольку угловые частоты этих токов в 2, 4, 6 и т. д. раз превышают основную угловую частоту ω . Амплитуды токов высших гармоник намного меньше амплитуды основной гармоники ($I_{2\max}/2$), поэтому при дальнейшем рассмотрении вопроса ими можно пренебречь и с некоторым допущением принять пульсирующий ток во вторичной цепи трансформатора состоящим из двух составляющих: постоянной I_d и переменной $i_{2\text{осн}}$, частота которой равна частоте тока в сети ω :

$$i_2 = I_d + i_{2\text{осн}}. \quad (1.40)$$

Пренебрегая током холостого хода и учитывая (1.40), запишем уравнение магнитодвижущих сил трансформатора в схеме выпрямления

$$i_1 w_1 + i_2 w_2 = i_1 w_1 + I_d w_2 + i_{2\text{осн}} w_2 = 0. \quad (1.41)$$

Магнитодвижущая сила постоянной составляющей $I_d w_2$ создает в магнитопроводе трансформатора постоянный магнитный поток Φ_d . Так

как $d\Phi_d/dt = 0$, то поток Φ , называемый *потоком вынужденного намагничивания*, электродвижущих сил в обмотках трансформатора не наводит, и поэтому не компенсируется магнитодвижущей силой первичной обмотки $i_1 w_1$. В итоге поток Φ_d создает дополнительное подмагничивание магнитопровода трансформатора. Это ведет к усилению магнитного насыщения магнитопровода и вызывает увеличение намагничивающего тока, а следовательно, и рост первичного тока. В результате увеличиваются потери и усиливается нагрев трансформатора, а его КПД уменьшается. Так, например, в однофазной схеме однополупериодного выпрямления мощность на входе трансформатора в 2,69 раза превышает полезную мощность на выходе $P_d = U_d I_{d\delta}$, т. е. $P_1 = 2,69 P_d$. В схемах двухполупериодного выпрямления ток в нагрузке R_n создается в течение обоих полупериодов переменного тока. В этом случае потребляемая трансформатором мощность $P_1 = 1,23 P_d$, т. е. условия работы трансформатора более благоприятные.

Выбор силового трансформатора для выпрямителя ведется по *типовой мощности* S_T , представляющей собой среднеарифметическое значение номинальных мощностей первичной S_{1T} и вторичной S_{2T} обмоток трансформатора:

$$S_T = 0,5(S_{1T} + S_{2T}) = 0,5m(U_{1ном} I_{1ном} + U_{2ном} I_{2ном}), \quad (1.42)$$

где m — число фаз ($m = 1$ для однофазного и $m = 3$ для трехфазного трансформаторов).

В случае трехфазного трансформатора в (1.42) подставляют фазные значения токов напряжений.

Типовую мощность выбранного трансформатора запишем в виде

$$S_T = k_T U_{dном} I_{dном}, \quad (1.43)$$

где k_T — коэффициент типовой мощности; $U_{dном}$ и $I_{dном}$ — требуемые номинальные значения постоянного напряжения и тока.

Требуемое номинальное значение вторичного напряжения трансформатора

$$U_{2ном} = k_U U_{dном}, \quad (1.44)$$

где k_U — коэффициент напряжения.

Коэффициенты k_T и k_U выбираются в зависимости от схемы выпрямления (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Схемы выпрямления	Значения коэффициентов	
	k_U	k_T
Однофазная однополупериодная	2,22	3,09
Однофазная двухполупериодная мостовая	1,11	1,23
Однофазная двухполупериодная с нулевым выводом	1,11	1,48
Трехфазная с нулевым выводом	0,855	1,345
Трехфазная мостовая	0,427	1,05

Лучшее использование трансформатора обеспечивается в мостовых схемах выпрямления.

1.9. Автотрансформаторы

Автотрансформатор в отличие от трансформатора имеет одну обмотку, часть витков которой принадлежит одновременно первичной и вторичной цепям.

На рис 1.10, а показана схема понижающего автотрансформатора, в котором участок aX — общая часть витков с током I_{12} .

Как в обычном трансформаторе, первичный I_1 и вторичный I_2 токи автотрансформатора практически находятся в противофазе, т. е. их векторы сдвинуты относительно друг друга на угол, близкий к 180° . Из этого следует, что ток I_{12} в общей части витков aX равен разности вторичного и первичного токов автотрансформатора:

$$I_{12} = I_2 - I_1 \quad (1.45)$$

или

$$I_2 = I_1 + I_{12} \quad (1.46)$$

Мощность, передаваемая нагрузке Z_H , $B \cdot A$,

$$S_A = U_2 I_2. \quad (1.47)$$

С учетом (1.46) получим

$$S_A = U_2(I_2 + I_1) = U_2 I_1 + U_2 I_2 = S_{3A} + S_{эм A} \quad (1.48)$$

где $S_{3A} = U_2 I_1$ — мощность, передаваемая во вторичную цепь автотрансформатора электрическим путем благодаря электрической связи между первичной и вторичной цепями: $S_{эм A} = U_2 I_{12}$ — мощность, передаваемая во вторичную цепь автотрансформатора электромагнитным путем, посредством магнитного потока.

Габаритные размеры трансформатора или автотрансформатора определяются их электромагнитными мощностями: для трансформатора $S_{эм T} = E_2 I_2$, для автотрансформатора $S_{эм A} = E_2 I_{12}$. В этих выражениях принимаем $U_2 \approx E_2$. Известно, что в автотрансформаторе элек-

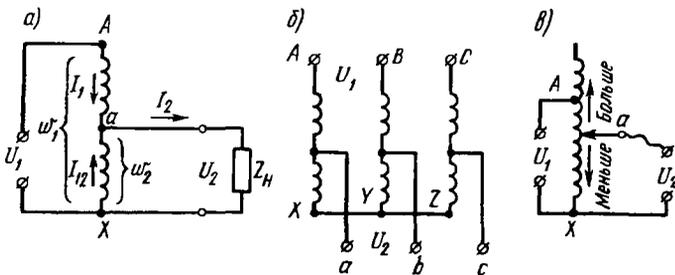


Рис. 1.10. Принципиальные схемы автотрансформаторов однофазного (а), трехфазного (б) и однофазного регулировочного (в)

электромагнитным путем передается только часть всей поступающей во вторичную цепь мощности, т. е. $S_{эм,А} < S_{эм,Т}$, что позволяет уменьшить сечение магнитопровода и сократить среднюю длину витка обмотки. Это ведет к уменьшению расходов электротехнической стали и обмоточной меди на изготовление автотрансформатора и уменьшению магнитных и электрических потерь. Таким образом, автотрансформатор по сравнению с трансформатором равной мощности обладает меньшими размерами и массой, более высоким КПД, меньшей стоимостью.

Указанные преимущества автотрансформатора тем значительнее, чем большая доля мощности передается в нагрузку электрическим путем, т. е. чем больше мощность, передаваемая во вторичную цепь автотрансформатора электрическим путем $S_{э,А}$. Эта мощность обратно пропорциональна коэффициенту трансформации:

$$S_{э,А} = S_A/k_A, \quad (1.49)$$

где $k_A = w_{AX}/w_{aX}$ — коэффициент трансформации автотрансформатора.

Электромагнитная мощность автотрансформатора определяется выражением

$$S_{эм,А} = S_A(1 - 1/k_A). \quad (1.50)$$

На рис. 1.11 представлена зависимость относительного значения массы автотрансформатора $G_A/G_{Тр}$, где G_A — масса автотрансформатора, а $G_{Тр}$ — масса трансформатора такой же мощности, от коэффициента трансформации $k_A = w_{AX}/w_{aX}$. Из графика следует, что с увеличением коэффициента трансформации k_A масса автотрансформатора возрастает, а следовательно, снижаются преимущества автотрансформатора по сравнению с трансформатором. Так, при $k_A \geq 2$ масса автотрансформатора почти равна массе трансформатора. Таким образом, масса и габаритные размеры автотрансформаторов по сравнению с трансформаторами существенно меньше при коэффициенте трансформации $k_A < 2$.

Наряду с преимуществами автотрансформатор имеет недостатки, ограничивающие в ряде случаев его применение. Основные из этих недостатков: 1) при коротком замыкании на вторичной стороне часть aX обмотки (см. рис. 1.10) шунтируется и ток короткого замыкания достигает намного большего значения, чем в случае обычного двухобмоточного трансформатора; 2) резкое повышение напряжения на стороне НН до уровня напряжения на стороне ВН при коротком замыкании на участке катушки Aa или при обрыве катушки на участке aX ; 3) наличие электрической связи между первичной и вторичной сторонами, что в некоторых схемах недопустимо.

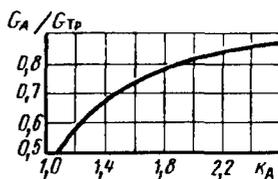


Рис. 1.11. Зависимость относительной активной массы автотрансформатора от коэффициента трансформации

Автотрансформаторы могут быть понижающими и повышающими, однофазными и трехфазными. У трехфазного трансформатора обмотки фаз соединяют звездой (см. рис. 1.10, б).

Широкое распространение получили автотрансформаторы с переменным коэффициентом трансформации. Такие автотрансформаторы снабжаются устройством, позволяющим регулировать величину вторичного напряжения путем изменения числа витков aX . Это осуществляется посредством скользящего контакта (щетке или ролика), перемещаемого непосредственно по зачищенной от изоляции поверхности витков обмотки (рис. 1.10, в). Такие автотрансформаторы называют регуляторами напряжения. Отечественной промышленностью изготавливаются регуляторы напряжения небольшой мощности серий РНО (однофазные) и РНТ (трехфазные).

Контрольные вопросы

1. Почему обмотку низшего напряжения трансформатора выполняют проводом большего сечения?
2. Почему с увеличением вторичного тока трансформатора растет первичный ток?
3. На что расходуется мощность, потребляемая трансформатором в режимах холостого хода и короткого замыкания?
4. В чем особенность выбора трансформатора для выпрямительной установки?
5. Объясните достоинства и недостатки автотрансформаторов.

Глава 2

Трансформаторные устройства специального назначения

2.1. Пик-трансформаторы

Пик-трансформаторы применяются для преобразования синусоидального напряжения в импульсы пикообразной формы. Такие импульсы напряжения с крутым фронтом необходимы для управления тиристорами либо другими полупроводниковыми или электронными устройствами.

Принцип работы пик-трансформатора основан на явлении магнитного насыщения ферромагнитного материала. Существует несколько конструктивных исполнений пик-трансформаторов. Рассмотрим *пик-трансформатор с магнитным шунтом* (рис. 2.1). Первичная обмотка w_1 расположена на стержне увеличенного сечения, в котором не наступает состояния магнитного насыщения. Стержень со вторичной обмоткой w_2 имеет уменьшенное сечение, и при некотором значении напряжения u_1 (магнитного потока Φ_1) в нем наступает магнитное насыщение. Третий стержень — это магнитный шунт, отделенный от остальной части магнитопровода воздушным зазором. Переменный магнитный поток среднего стержня Φ_1 разветвляется через боковые стержни, т. е. $\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_{\text{ш}}$. На рис. 2.2 показаны магнитные характеристики трех стержней: Φ_1 , Φ_2 , $\Phi_{\text{ш}} = f(I_1)$. При этом график $\Phi_{\text{ш}} = f(I_1)$ имеет вид прямой линии, так как благодаря воздушным зазорам этот стержень не насыщается.

При синусоидальном первичном напряжении u_1 магнитный поток Φ_1 также синусоидален (рис. 2.3, а). При малых мгновенных значениях напряжения u_1 и магнитного потока Φ_1 поток $\Phi_2 > \Phi_{\text{ш}}$, т. е.

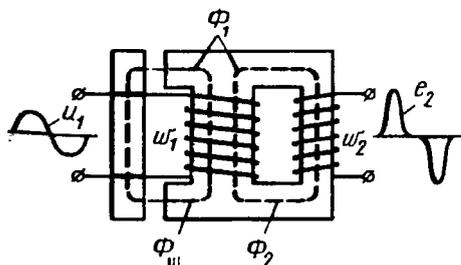


Рис. 2.1. Электромагнитная схема пик-трансформатора с магнитным шунтом

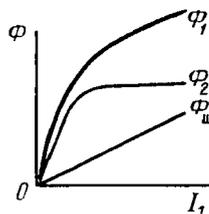


Рис. 2.2. Магнитные характеристики стержней пик-трансформатора

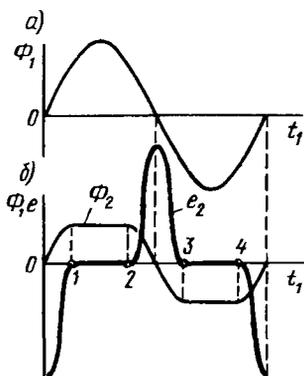


Рис. 2.3. Графики магнитных потоков и ЭДС вторичной обмотки пик-трансформатора

Так как ЭДС, наведенная во вторичной обмотке, пропорциональна скорости изменения потока Φ_2 , т. е. $e_2 = -w_2 d\Phi_2/dt$, то участку графика $\Phi_2 = f(t_1)$ на интервалах времени 1—2 и 3—4 (рис. 2.3, б), когда поток Φ_2 практически неизменен, соответствует ЭДС $e_2 = 0$. В момент времени, соответствующий изменению направления (знака) магнитного потока Φ_2 , ЭДС e_2 резко возрастает и ее график приобретает пикообразную форму.

Для обеспечения удовлетворительных энергетических показателей пик-трансформаторов их магнитопроводы изготавливают из сплава типа пермаллой.

2.2. Импульсные трансформаторы

В электронных устройствах для согласования полных сопротивлений, изменения знака и амплитуды импульсов, а также для размножения импульсов применяют импульсные трансформаторы. Одно из основных требований, предъявляемых к импульсным трансформаторам, — минимальное искажение формы трансформируемых импульсов.

Для выяснения принципиальной возможности преобразования кратковременных однополярных импульсов рассмотрим идеальный трансформатор (без потерь и паразитных емкостей), работающий без нагрузки. Пусть на вход этого трансформатора подаются однополярные импульсы прямоугольной формы продолжительностью t_n с периодом T (рис. 2.4, а). Первичный контур трансформатора с активным сопротивлением r_1 обладает некоторой постоянной времени $\tau = L_1/r_1$, обусловленной индуктивностью этого контура L_1 .

Рассмотрим случай, когда постоянная времени первичного контура намного меньше продолжительности импульса, т. е. $\tau \ll t_n$. При этом график первичного тока $i_1 = f(t)$ имеет вид кривой, отли-

значительная часть магнитного потока Φ_1 замыкается через стержень со вторичной обмоткой w_2 (см. рис. 2.1), а меньшая часть — через шунт, отделенный от основной части магнитопровода воздушными зазорами.

С ростом мгновенных значений первичного напряжения u_1 увеличивается магнитный поток Φ_1 и наступает магнитное насыщение стержня со вторичной обмоткой w_2 . При этом нарастание потока Φ_2 в стержне со вторичной обмоткой w_2 практически прекращается (см. рис. 2.3, б). Так как ЭДС, наведенная во вторичной обмотке, пропорциональна скорости изменения потока Φ_2 , т. е. $e_2 = -w_2 d\Phi_2/dt$,

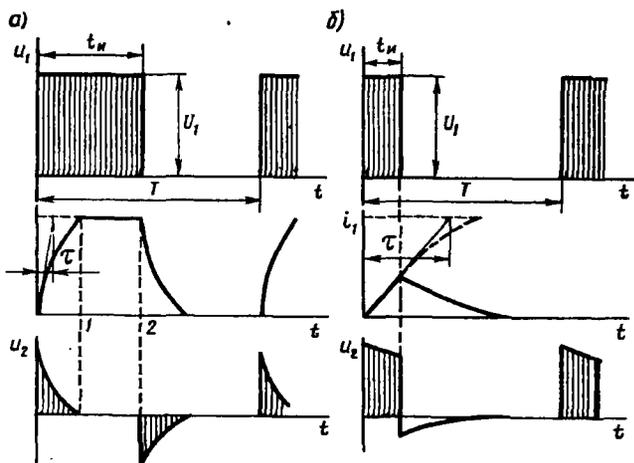


Рис. 2.4. Графики напряжения импульсного трансформатора

чающейся от прямоугольника, а кривая вторичного напряжения $u_2 = f(t)$ значительно искажена: в интервале времени 1—2 напряжение $u_2 = 0$, так как при $i_1 = \text{const}$ ЭДС $e_2 = M(di_1/dt) = 0$, где M — взаимная индуктивность обмоток. Следовательно, при $\tau \ll t_n$ трансформирование импульсов сопровождается их значительным искажением.

Рассмотрим случай, когда постоянная времени намного больше продолжительности импульса, т. е. $\tau \gg t_n$. Этот случай более реален, так как продолжительность импульсов обычно не превышает 10^{-4} с. Теперь, когда импульс напряжения u_1 прекращается еще до окончания переходного процесса в первичной цепи, импульсы напряжения u_2 на выходе трансформатора не имеют значительных искажений (рис. 2.4, б). Возникающая отрицательная часть импульса u_2 легко устраняется включением полупроводникового диода во вторичную цепь трансформатора.

Рассмотренные явления определяют лишь принципиальную возможность преобразования кратковременных однополярных импульсов без особого искажения их формы. При более подробном рассмотрении работы импульсного трансформатора электромагнитные процессы в нем оказываются намного сложнее, так как на них влияют: гистерезис материала магнитопровода, вихревые токи, паразитные емкостные связи между витками и обмотками, а также индуктивности рассеяния обмоток. Для ослабления этого нежелательного влияния импульсные трансформаторы проектируют так, чтобы в рабочем режиме их магнитопровод не был насыщен, т. е. с таким значением магнитной индукции в магнитопроводе, при котором рабочая точка расположена ниже зоны магнитного насыщения трансформатора. Кроме того, материал магни-

топровода должен обладать малой коэрцитивной силой (иметь узкую петлю гистерезиса). Для понижения остаточной индукции магнитопровод импульсного трансформатора выполняют с небольшим воздушным зазором, иногда применяют подмагничивание импульсного трансформатора постоянным током, полярность которого противоположна полярности трансформируемых однополярных импульсов. Последняя мера позволяет снизить магнитную индукцию в магнитопроводе трансформатора в интервале между импульсами.

Магнитопроводы импульсных трансформаторов изготавливают из магнитных материалов с повышенной магнитной проницаемостью (холоднокатаная сталь, железоникелевые сплавы типа пермаллой) при толщине ленты 0,02—0,35 мм. В некоторых случаях магнитопровод изготавливают из феррита.

Для уменьшения паразитных емкостей и индуктивности рассеяния обмоток последние делают с небольшим числом витков. При этом малая продолжительность трансформируемых импульсов позволяет выполнять обмотки импульсных трансформаторов проводом уменьшенного поперечного сечения, не вызывая недопустимых перегревов. Это способствует уменьшению габаритных размеров и массы импульсных трансформаторов.

2.3. Умножители частоты

Трансформаторные устройства, состоящие из магнитопроводов и обмоток, можно использовать для умножения частоты переменного тока, т. е. увеличения частоты в целое число раз. Практическое применение получили удвоители и утроители частоты.

Удвоитель частоты. Два замкнутых магнитопровода имеют пять обмоток (рис. 2.5). Первичную обмотку w_1 выполняют так, чтобы она охватывала сразу же два магнитопровода. При включении обмотки в

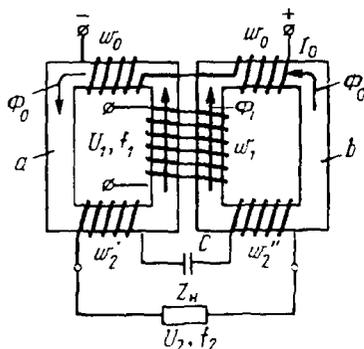


Рис. 2.5. Электромагнитная схема удвоителя частоты

сеть переменного тока с синусоидальным напряжением и частотой f_1 она создает в каждом магнитопроводе переменную МДС F_1 . Две секции вторичной обмотки w_2' и w_2'' , каждая из которых расположена на своем магнитопроводе, включены друг с другом последовательно согласованно, так что результирующий магнитный поток, сцепленный с этими обмотками, равен сумме потоков магнитопроводов $\Phi_a + \Phi_b$. Кроме того, на каждом магнитопроводе имеется по одной обмотке подмагничивания w_0 ,

включенных между собой последовательно согласно. При включении этих обмоток на постоянное напряжение U_0 в каждом из магнитопроводов возникает подмагничивающая МДС $F_0 = I_0 w_0$.

При включении в сеть с синусоидальным напряжением u_1 и частотой f_1 (рис. 2.6, а) обмотка w_1 в течение первого полупериода напряжения u_1 создает МДС $F_1 = I_1 w_1$ в магнитопроводе a , направленную согласно с МДС постоянного тока F_0 . При этом магнитные потоки в магнитопроводе a складываются и создают результирующий поток $\Phi_a = \Phi_0 + \Phi_1$. За счет магнитного насыщения магнитопровода a график этого потока $\Phi_a = f(t)$ имеет уплощенный вид (рис. 2.6, б).

В магнитопроводе b в этом же полупериоде МДС потоки Φ_0 и Φ_1 действуют встречно, создавая результирующий поток $\Phi_b = \Phi_0 - \Phi_1$, имеющий значительный провал в середине первого полупериода. Во втором полупериоде напряжения u_1 в магнитопроводе a создается поток, равный разности $\Phi_a = \Phi_0 - \Phi_1$, а в магнитопроводе b — поток, равный сумме $\Phi_b = \Phi_0 + \Phi_1$. Вторичную обмотку, состоящую из двух секций ($w_2 = w_2' + w_2''$), охватывает суммарный магнитный поток $\Phi_a + \Phi_b$, график которого $(\Phi_a + \Phi_b) = f(t)$ построен путем суммирования ординат потоков Φ_a и Φ_b (рис. 2.6, в). Этот поток содержит постоянную составляющую $\Phi_{\text{пост}}$, не принимающую участия в наведении вторичной ЭДС и явно выраженную переменную составляющую второй гармоники, которая наводит в секциях вторичной обмотки ЭДС E_2 частотой $f_2 = 2f_1$. Электродвижущая сила первичной обмотки E_1 , так же как и первичное напряжение U_1 , имеет частоту f_1 .

Для компенсации индуктивных падений напряжений во вторичную цепь удвоителя частоты включают конденсатор емкости C , что повышает коэффициент мощности $\cos \varphi$ удвоителя и уменьшает наклон его внешней характеристики $U_2 = f(I_2)$.

Утроитель частоты. Работа утроителя частоты основана на явлении искажения синусоидальной формы графика переменного магнитного потока в магнитопроводе. Пусть к первичной обмотке w_1 трансформатора подведено синусоидальное напряжение. При этом маг-

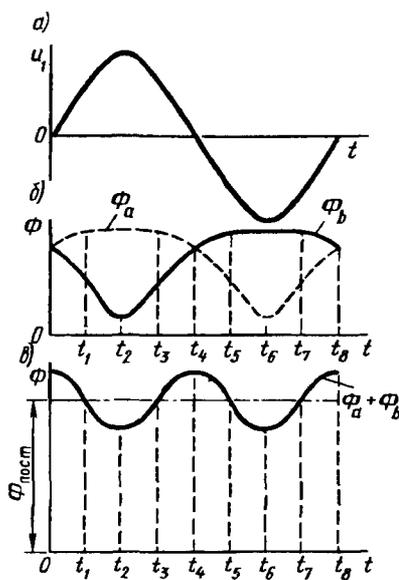


Рис. 2.6. Графики напряжения и магнитных потоков удвоителя частоты

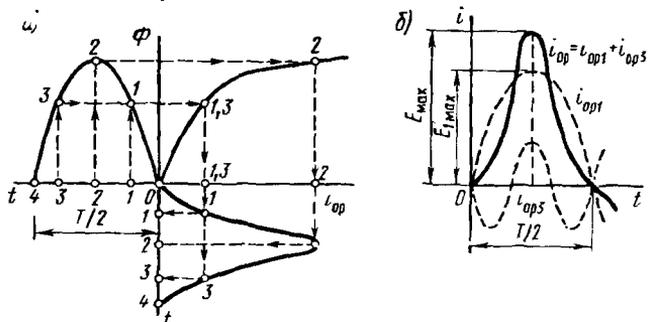


Рис. 2.7. Построение графика намагничивающего тока (а) и разложение его на составляющие (б)

нитный поток в магнитопроводе также синусоцидален $\Phi = \Phi_{max} \sin \omega t$. Вследствие насыщения сердечника магнитный поток становится непропорциональным намагничивающему току i_{op} . Поэтому при синусоцидалном магнитном потоке Φ ток i_{op} оказывается несинусоцидалным. Для подтверждения рассмотрим построения (рис. 2.7, а), выполненные для определения формы графика намагничивающего тока $i_{op} = f(t)$ с использованием кривой намагничивания магнитопровода $\Phi = f(i_{op})$ и графика магнитного потока $\Phi = f(t)$. Для получения графика намагничивающего тока $i_{op} = f(t)$ (правая нижняя четверть осей координат) на графике $\Phi = f(t)$ выбирают ряд точек (1, 2 и 3), проектируют их на кривую намагничивания и определяют значения намагничивающего тока. Затем проводят вертикальные линии через точки 1, 3 и 2 на оси i_{op} в правую нижнюю четверть до пересечения с горизонтальными линиями, проведенными из точек 1, 2 и 3 на оси времени t этой четверти, и получают геометрическое место точек кривой намагничивающего тока $i_{op} = f(t)$.

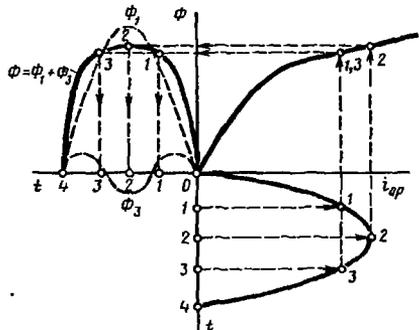


Рис. 2.8. Построения графика магнитного потока при синусоцидалном намагничивающем токе

Из сделанных построений видно, что при синусоцидалной форме графика $\Phi = f(t)$ и нелинейной кривой намагничивания намагничивающий ток имеет пикообразную форму.

После разложения несинусоцидалной кривой тока i_{op} на синусоцидалные составляющие (рис. 2.7, б) видим, что в этом токе кроме первой (основной) гармоники i_{op1} явно выражена третья гармоника i_{op3} , частота которой $f_3 = 3f_1$. Так, в транс-

форматоре с магнитопроводом из электротехнической стали при магнитной индукции $B = 1,4$ Тл амплитуда третьей гармоники составляет примерно 30% от амплитуды первой гармоники намагничивающего тока.

Если три однофазных трансформатора соединить в трансформаторную группу (см. рис. 1.7, а), то токи третьей гармоники в обмотках, соединенных звездой, совпадая по фазе, будут взаимно

уравновешиваться. При этом намагничивающий ток в каждом из трех трансформаторов станет синусоидальным. Но в этом случае магнитный поток в каждом из магнитопроводов станет несинусоидальным «уплощенным», с явно выраженной третьей гармоникой Φ_3 (рис. 2.8).

Утроитель частоты состоит из трех однофазных трансформаторов, работающих с сильно насыщенным магнитопроводом. Первичные обмотки трансформаторов соединены звездой, а вторичные — последовательно (рис. 2.9).

В утроителе частоты потоки третьей гармоники, замыкаясь по независимым магнитопроводам, достигают в них больших значений и наводят во вторичных обмотках ЭДС третьей гармоники e_3 . Так, если эти ЭДС во всех вторичных обмотках утроителя совпадают по фазе, то на выходе утроителя частоты устанавливается переменное напряжение U_3 , равное алгебраической сумме ЭДС e_3 с частотой $f_3 = 3f_1$. Электродвижущая сила первой гармоники хотя и наводится во вторичных обмотках утроителя, но в составе напряжения на выходе утроителя частоты отсутствует, так как при сдвиге фаз между ЭДС в 120° их алгебраическая сумма равна нулю.

Для снижения индуктивного падения напряжения, возникающего во вторичных обмотках утроителя при нагрузке, в его вторичную цепь включают конденсатор емкостью C , который компенсирует индуктивность вторичных обмоток.

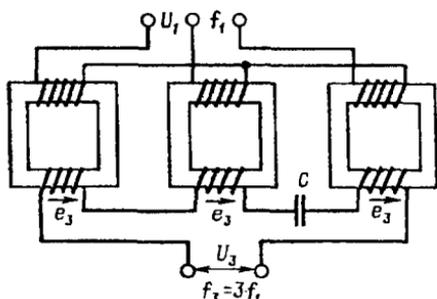


Рис.2.9. Электромагнитная схема утроителя частоты

2.4. Стабилизаторы напряжения

Стабилизаторы напряжения предназначены для поддержания практически неизменным напряжения на входе каких-либо устройств автоматики, чувствительных к колебаниям напряжения сети U_1 .

Основной показатель работы стабилизатора напряжения — коэффициент стабилизации по напряжению, показывающий, во сколько раз относительное изменение напряжения на выходе стабилизатора

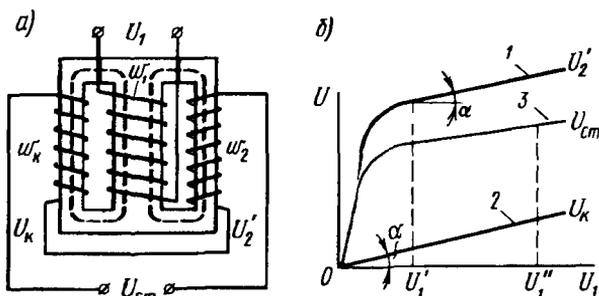


Рис. 2.10. Электромагнитная схема ферромагнитного стабилизатора напряжения и графики напряжений

$(\Delta U_{\text{ст}}/U_{\text{ст}})$ меньше относительного изменения напряжения на его входе $(\Delta U/U_1)$:

$$k_{\text{ст}} = (\Delta U/U_1) : (\Delta U_{\text{ст}}/U_{\text{ст}}), \quad (2.1)$$

где $\Delta U = U_{1\text{max}} - U_{1\text{min}}$; $\Delta U_{\text{ст}} = U_{\text{стmax}} - U_{\text{стmin}}$.

Основные виды стабилизаторов трансформаторного принципа действия: ферромагнитные стабилизаторы насыщенного типа и феррорезонансные стабилизаторы (содержащие емкость C).

Ферромагнитный стабилизатор напряжения представляет собой трехстержневой магнитопровод, на среднем стержне которого расположена первичная обмотка w_1 (рис. 2.10, а). На правом стержне, работающем в условиях сильного магнитного насыщения, расположена вторичная обмотка w_2 . На левом ненасыщенном стержне расположена компенсационная обмотка w_k . При колебаниях напряжения U_1 на входе стабилизатора изменяется магнитный поток в среднем стержне, но поток в правом стержне изменяется незначительно, так как стержень насыщен. Поэтому колебания напряжения U_1 на выходе вторичной обмотки стабилизатора (кривая 1 на рис. 2.10, б) незначительны и компенсируются напряжением U_k компенсационной обмотки, зависимость которого от напряжения U_1 имеет вид прямой линии, так как левый стержень стабилизатора ненасыщен (прямая 2 на рис. 2.10, б). При правильном подборе параметров обмоток и магнитопровода стабилизатора угол наклона α прямолинейного участка кривой 1 равен углу наклона прямой 2. В этом случае напряжение на выходе оказывается стабилизированным:

$$U_{\text{ст}} = U_2' - U_k. \quad (2.2)$$

Так, при колебаниях напряжения U_1 в пределах $\pm 20\%$ от номинального значения при неизменных нагрузке и частоте выходное напряжение колеблется в пределах $\pm 3\%$, т. е. коэффициент стабилиза-

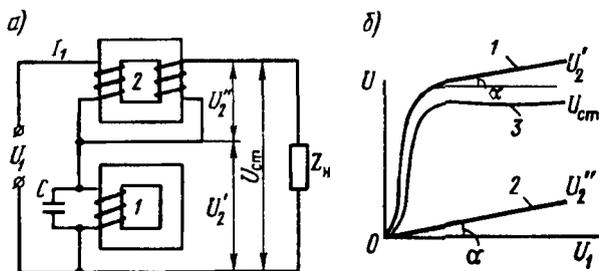


Рис. 2.11. Электромагнитная схема феррорезонансного стабилизатора напряжения и графики напряжений

ции по напряжению $k_{ст} \approx 7$. Обычно для ферромагнитных стабилизаторов $k_{ст}$ не превышает 10. Основные недостатки ферромагнитных стабилизаторов: небольшой коэффициент стабилизации по напряжению, низкий КПД (не более 40—60%), небольшой коэффициент мощности (не более 0,4), несинусоидальное выходное напряжение. Указанные недостатки ограничивают применение ферромагнитных стабилизаторов напряжения.

Феррорезонансный стабилизатор напряжения обладает лучшими свойствами (рис. 2.11, а). Он состоит из реактора 1, магнитопровод которого при заданном диапазоне напряжений U_1 насыщен, конденсатора C , автотрансформатора 2, магнитопровод которого ненасыщен. Обмотка автотрансформатора 2 включена так, что напряжение на выходе стабилизатора

$$U_{ст} = U_2' - U_2'' \quad (2.3)$$

где U_2' — напряжение на выводах реактора; U_2'' — напряжение на выводах автотрансформатора (рис. 2.11, а).

Напряжение U_2' благодаря резонансу токов в контуре L_1C , где L_1 — индуктивность реактора, имеет резко нелинейную зависимость от напряжения U_1 (кривая 1 на рис. 2.11, б). Напряжение U_2'' пропорционально напряжению U_1 (прямая 2) и компенсирует изменение напряжения U_2' на прямолинейном участке кривой 1. При этом условии напряжение на выходе стабилизатора $U_{ст}$ изменяется незначительно при заданном диапазоне колебания напряжения на входе стабилизатора (кривая 3). Коэффициент полезного действия феррорезонансного стабилизатора достаточно высок и составляет 80—85%, а коэффициент стабилизации по напряжению $k_U = 20 \div 40$.

К недостаткам феррорезонансных стабилизаторов относится заметная зависимость коэффициента стабилизации от частоты тока в сети и от коэффициента мощности нагрузки. Указанные недостатки в

этом стабилизаторе проявляются в меньшей степени, чем в ферромагнитном стабилизаторе. Для ослабления несинусоидальности выходного напряжения ферромагнитных и феррорезонансных стабилизаторов в схему стабилизаторов вводят компенсирующие контуры.

Контрольные вопросы

1. Объясните назначение и процесс работы пик-трансформатора.
2. При каком соотношении постоянной времени и продолжительности импульса импульсный трансформатор работает без значительных искажений?
3. Почему утроитель частоты выполняют на отдельных магнитопроводах?
4. Какова разница между ферромагнитным и феррорезонансным стабилизаторами?

Раздел 2

Силовые электродвигатели автоматических устройств

Электродвигатель — это основной элемент электропривода, осуществляющий преобразование электрической энергии в механическую, для приведения в движение различных станков и механизмов, транспортных и подъемных средств, подвижных частей приборов и аппаратов.

Электромашиностроительной промышленностью изготавливаются силовые электродвигатели мощностью от нескольких ватт до нескольких тысяч киловатт. Наибольшее применение в современном электроприводе получили асинхронные электродвигатели, отличающиеся простотой конструкции и надежностью, высокими технико-экономическими показателями.

В данном разделе рассматриваются силовые электродвигатели малой мощности (до 0,6—1,0 кВт), применяемые в автоматике, приборной технике, электробытовых устройствах, электроинструменте и т. п. Эти электродвигатели весьма разнообразны по своему конструктивному исполнению, условиям эксплуатации и характеристикам. Так, асинхронные электродвигатели малой мощности разделяются на трехфазные, двухфазные (конденсаторные) и однофазные, а коллекторные электродвигатели — на постоянного тока и универсальные, с электромагнитным возбуждением и возбуждением постоянными магнитами. Применяются и другие разновидности силовых электродвигателей малой мощности.

Глава 3

Трехфазные асинхронные двигатели

■ 3.1. Принцип действия трехфазного асинхронного двигателя

Трехфазные асинхронные двигатели находят самое широкое применение в различных областях техники. Не менее 90% всех электродвигателей, применяемых в народном хозяйстве, являются асинхронными. Такое широкое использование эти двигатели получили благодаря простоте конструкции и надежности в работе. В устройствах автоматики они применяются главным образом для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения.

Принцип действия трехфазного асинхронного двигателя основан на способности трехфазной обмотки при включении ее в сеть трехфазного тока создавать вращающееся магнитное поле. Частота вращения этого поля n_1 , или *синхронная частота вращения* (об/мин), прямо пропорциональна частоте переменного тока f_1 и обратно пропорциональна числу пар полюсов p трехфазной обмотки:

$$n_1 = f_1 60/p. \quad (3.1)$$

Для частоты $f_1 = 50$ Гц ниже приведены некоторые синхронные частоты вращения магнитного поля.

Число пар полюсов p	1	2	3	4	5	6
Синхронная частота вращения n_1 , об/мин	3000	1500	1000	750	600	500

Если необходимо изменить направление вращения магнитного поля, то изменяют порядок следования фаз трехфазной системы токов, подводимых к трехфазной обмотке. Число полюсов асинхронного двигателя определяется конструкцией обмотки статора, при этом число полюсов ротора равно числу полюсов статора.

Для объяснения принципа действия трехфазного асинхронного двигателя воспользуемся упрощенной моделью, состоящей из неподвижной части 1, называемой *статором*, и вращающейся части 2, называемой *ротором*, разделенных воздушным зазором (рис. 3.1). Сердечник статора состоит из спинки (ярма), через которую замыкается магнитный поток вращающегося магнитного поля, и зубцов, между которыми находятся пазы с расположенной в них трехфазной обмот-

кой. В расточке сердечника статора находится ротор, состоящий из вала, сердечника и обмотки, которая расположена в пазах сердечника и состоит из медных или алюминиевых стержней, замкнутых с обеих сторон кольцами (рис 3.2, а) Такая обмотка называется короткозамкнутой.

При включении обмотки статора в трехфазную сеть в магнитной системе двигателя возникает магнитное поле, вращающееся с синхронной частотой n_1 . Поле сцепляется с обмоткой ротора и индуцирует в его стержнях электродвижущие силы, направление которых определяют по правилу «правой руки». Обмотка ротора замкнута, поэтому ЭДС, наведенные в стержнях этой обмотки, создадут в них токи. В результате взаимодействия токов в роторе с вращающимся полем статора на стержнях ротора создаются электромагнитные силы $F_{эм}$, направление которых определяют по правилу «левой руки». Совокупность электромагнитных сил $F_{эм}$ образует на роторе электромагнитный момент M , под действием которого ротор приводится во вращение с частотой n_2 в направлении вращения магнитного поля статора. Вращение ротора через вал передается рабочему механизму. Таким образом электрическая энергия, поступающая из сети в обмотку статора, преобразуется в асинхронном двигателе в механическую энергию вращения.

Отличительный признак асинхронного двигателя состоит в том, что частота вращения n_2 ротора меньше синхронной частоты вращения n_1 магнитного поля статора.

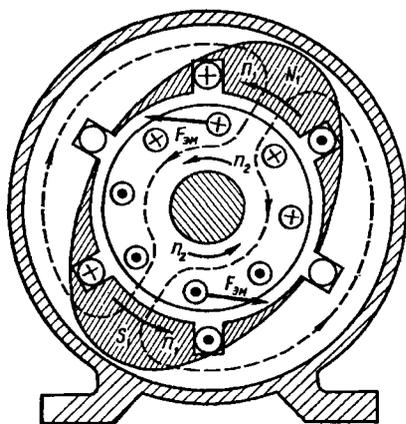


Рис 3.1. Упрощенная модель асинхронного двигателя

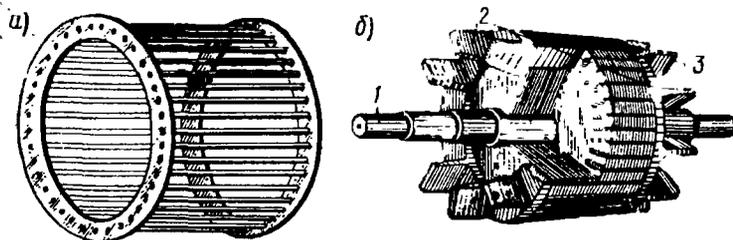


Рис 3.2. Короткозамкнутый ротор

Объясняется это тем, что ЭДС в стержнях обмотки ротора индуцируется только при неравенстве частот вращения $n_2 < n_1$. Частота вращения поля статора относительно ротора определяется *частотой скольжения* $n_s = n_1 - n_2$. Отставание ротора от вращающегося поля статора характеризуется относительной величиной s , называемой *скольжением*:

$$s = (n_1 - n_2)/n_1. \quad (3.2)$$

Скольжение асинхронного двигателя может изменяться в диапазоне от 0 до 1, т. е. 0—100%. Если $s \approx 0$, то это соответствует режиму холостого хода, когда ротор двигателя практически не испытывает противодействующего момента, если $s = 1$ — режиму короткого замыкания, при котором ротор двигателя неподвижен ($n_2 = 0$). Скольжение зависит от механической нагрузки на валу двигателя и с ее ростом увеличивается.

Скольжение, соответствующее номинальной нагрузке двигателя, называется *номинальным скольжением*. Для асинхронных двигателей малой и средней мощности номинальное скольжение изменяется в пределах от 0,08 до 0,02, т. е. 8—2%.

Частота вращения ротора асинхронного двигателя согласно (3.2), об/мин,

$$n_2 = n_1(1 - s) = [(f_1 60)/p](1 - s). \quad (3.3)$$

При изменениях нагрузки на валу двигателя частота вращения n_2 изменяется пропорционально $(1 - s)$.

■ 3.2. Устройство трехфазных асинхронных двигателей

Широко применяются в автоматике трехфазные асинхронные двигатели серии 4А основного исполнения мощностью от 0,06 до 0,75 кВт и двигатели серии АОЛ мощностью от 0,05 до 0,6 кВт.

На рис. 3.3. показано устройство трехфазного асинхронного двигателя серии 4А закрытого обдуваемого исполнения. Статор состоит из корпуса 7 и сердечника 6 с обмоткой 8. Корпус отливают из алюминия (в двигателях малой мощности) либо из чугуна (в двигателях средней мощности). Наружная поверхность корпуса имеет ребра 13, увеличивающие поверхность охлаждения. В корпусе расположен сердечник статора, имеющий шихтованную конструкцию: отштампованные листы из тонколистовой электротехнической стали толщиной обычно 0,5 мм покрыты слоем изоляционного лака, собраны в пакет и скреплены специальными скобами или продольными сварными швами по наружной поверхности пакета. Такая конструкция сердечника способствует значительному снижению вихревых токов, возникающих в процессе пере-

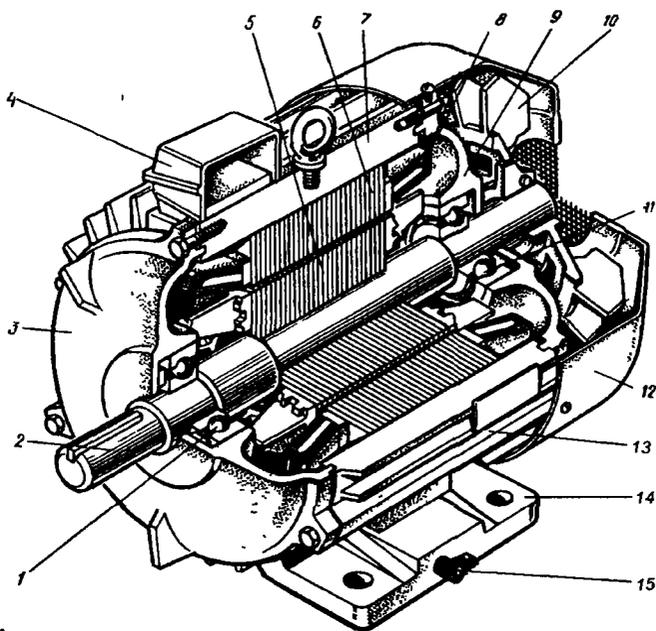


Рис. 3.3. Устройство трехфазного асинхронного двигателя серии 4А закрытого обдуваемого исполнения

Магнитичивания сердечника вращающимся магнитным полем. В пазах сердечника расположены пазовые части обмотки статора, соединенные в определенном порядке лобовыми частями обмотки 8, находящимися за пределами сердечника по его торцевым сторонам.

Внутри статора расположена вращающаяся часть двигателя — ротор, состоящий из сердечника 5 с короткозамкнутой обмоткой, вала 2. Сердечник ротора также имеет шихтованную конструкцию, но листы ротора не покрыты изоляционным лаком, так как имеющаяся на их поверхности пленка окисла — достаточная изоляция для ограничения вихревых токов, тем более что токи весьма незначительны из-за малой частоты перемагничивания сердечника ротора:

$$f_2 = \frac{pn}{60} = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} \cdot \frac{n_1}{n_2} = p \frac{n_1}{60} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1} = f_1 s. \quad (3.4)$$

Например, при $f_1 = 50$ Гц и номинальном скольжении $s_{\text{НОМ}} = 0,06$ частота перемагничивания ротора, а следовательно, и частота наведенных в обмотке ротора токов $f_2 = 50 \cdot 0,06 = 3$ Гц.

Короткозамкнутая обмотка ротора обычно выполняется заливкой сердечника ротора расплавленным алюминиевым сплавом. При этом

одновременно со стержнями отливаются короткозамыкающие кольца и вентиляционные лопатки (см. рис. 3.2, б).

Обмотки статора и ротора в асинхронном двигателе равномерно распределены по всему периметру внутренней поверхности сердечника статора и наружной поверхности сердечника ротора и называются *распределенными*. Вал ротора 2 вращается в подшипниках качения 1 и 11, расположенных в подшипниковых щитах 3 и 9.

Охлаждение двигателя осуществляется обдувом наружной поверхности корпуса. Поток воздуха создается центробежным вентилятором 10, прикрытым кожухом 12. На торцевой поверхности кожуха имеются отверстия для забора воздуха. В некоторых современных конструкциях асинхронных двигателей малой мощности вентилятор и кожух делают из пластмассы. Это способствует снижению массы и стоимости двигателя, уменьшению шума от работы вентилятора за счет снижения вибраций. Асинхронные двигатели весьма малой мощности (не более 20—40 Вт), работа которых не сопровождается значительным выделением теплоты, не имеют вентиляторов и выполняются с естественным охлаждением. В двигателях средней мощности (10 кВт и более) применяется защищенное исполнение с внутренней самовентилиацией. В подшипниковых щитах этих двигателей имеются отверстия (жалюзи), через которые посредством центробежного вентилятора воздух «прогоняется» по внутренней полости двигателя. Соприкасаясь с нагретыми частями (обмотками и сердечниками), поток воздуха обеспечивает более эффективное охлаждение.

Концы обмоток фазы статора присоединены к зажимам коробки выводов 4 (рис. 3.3). Если коробка выводов имеет шесть зажимов, обозначенных С1, С2 и С3 — начала обмоток фазы статора и С4, С5 и С6 — концы обмоток фазы статора (рис. 3.4, а), то такой двигатель можно включить в трехфазную сеть на два разных напряжения, отличающихся в $\sqrt{3}$ раз, соединяя обмотку статора либо в звезду, либо в треугольник. Например, если в паспорте двигателя указаны напряжения питающей сети 220/380 В, то при напряжении сети 380 В обмотку статора соединяют в звезду, а при 220 В — в треугольник (рис. 3.4, б). В обоих случаях на каждую обмотку фазы приходится напряжение 220 В. Если двигатель рассчитан на включение в сеть с каким-либо одним напряжением, то в коробке выводов имеется только три зажима.

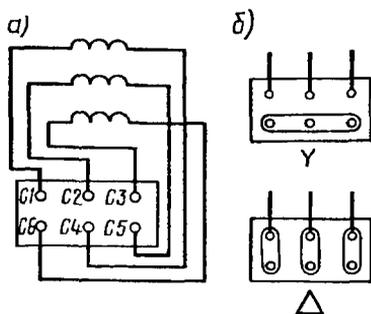


Рис. 3.4. Расположение выводов обмотки статора на клеммной панели (а) и способы соединения обмоток фаз статора (б)

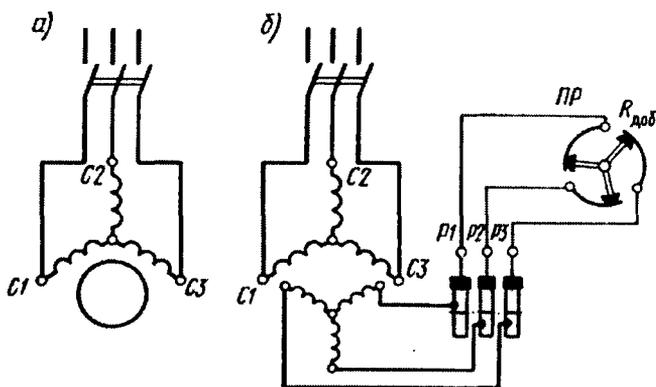


Рис. 3.5. Принципиальные схемы включения трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым (а) и фазным (б) роторами

Для крепления двигателя используют лапы 14 (см. рис. 3.3) или фланец со стороны выступающего конца вала.

Для предохранения обслуживающего персонала от возможного поражения электрическим током двигатели снабжаются болтами заземления 15 (см. рис. 3.3).

Принципиальная схема включения в сеть трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором показана на рис. 3.5, а. Асинхронные двигатели средней и большой мощности в некоторых случаях делают с фазным ротором. На сердечнике фазного ротора укладывают трехфазную обмотку, выполненную аналогично обмотке статора. Эту обмотку соединяют в звезду, а ее концы подключают к контактным кольцам, изолированным друг от друга и от вала. По кольцам скользят щетки, укрепленные в щеткодержателях. Посредством контактных колец и щеток обмотка фазного ротора зажимами $P1$, $P2$ и $P3$ соединяется с пусковым $ПП$ (рис. 3.5, б) или регулировочным реостатом сопротивлением $R_{доб}$. Асинхронные двигатели с фазным ротором имеют более сложную конструкцию, чем у двигателей с короткозамкнутым ротором, однако обладают лучшими пусковыми и регулировочными свойствами. Трехфазные асинхронные двигатели с фазным ротором обычно применяют в устройствах с тяжелыми условиями пуска, например в качестве крановых двигателей переменного тока, или же для привода устройств, требующих плавного регулирования частоты вращения (см. § 3.8 и 3.9).

В табл. 3.1 приведены технические данные некоторых асинхронных двигателей малой мощности серии 4А с синхронной частотой вращения $n_1 = 1500$ об/мин.

Таблица 3.1.

Тип двигателя	Номинальные данные				Пусковые данные			
	мощность, кВт	частота вращения, об/мин	ток статора, А	КПД	$\cos \varphi_1$	кратность пускового тока	кратность пускового момента	перегрузочная способность
4A50A4	0,06	1380	0,31	0,50	0,60	2,5	2,0	2,2
4A50B4	0,09	1370	0,42	0,55	0,60	2,5	2,0	2,2
4A56A4	0,12	1375	0,44	0,63	0,66	3,5	2,1	2,2
4A56B4	0,18	1365	0,66	0,64	0,64	3,5	2,1	2,2
4A63A4	0,25	1380	0,85	0,68	0,65	4,0	2,0	2,2
4A63B4	0,37	1365	1,2	0,68	0,69	4,0	2,0	2,2
4A71A4	0,55	1390	1,7	0,70	0,70	4,5	2,0	2,2
4A71B4	0,75	1390	2,17	0,72	0,73	4,5	2,0	2,2

Примечания. 1. При мощности 0,06—0,37 кВт двигатели изготавливаются на напряжение 220 или 380 В (три зажима в коробке выводов), при мощности 0,55 и 0,75 кВт — на напряжения 220, 380 или 660 В. 2. Ток статора соответствует напряжению сети 380 В.

■ 3.3. Основы теории трехфазного асинхронного двигателя

Анализируя принцип действия трехфазного асинхронного двигателя (см. § 3.1), заметим, что в асинхронном двигателе много общего с трансформатором.

Между обмотками статора и ротора двигателя, как и между первичной и вторичной обмотками трансформатора (см. § 1.1), существует только магнитная связь. Как и в трансформаторе, в асинхронном двигателе электроэнергия из сети поступает в первичную обмотку (обмотку статора) и за счет электромагнитных процессов передается во вторичную обмотку (обмотку ротора).

Такая аналогия между асинхронными двигателями и трансформаторами хорошо видна при неподвижном роторе ($n_2 = 0$; $s = 1$), что соответствует режиму пуска двигателя (обмотка статора включена в сеть, а ротор в начальный момент остается неподвижным). В этом случае отличие асинхронного двигателя от трансформатора только конструктивное, касающееся прежде всего особой конструкции сердечников и обмоток статора и ротора, наличия воздушного зазора в магнитопроводе (между статором и ротором), замкнутой накоротко обмотки ротора. Несмотря на это, электромагнитные процессы в асинхронном двигателе аналогичны электромагнитным процессам в трансформаторе, что позволяет основные соотношения, выведенные для трансформатора в виде уравнений напряжений для первичной (1.12) и вторич-

ной (1.14) цепей, а также уравнения токов (1.21) применить к асинхронному двигателю. Исходя из этого, уравнение напряжения для обмотки фазы статора асинхронного двигателя

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1. \quad (3.5)$$

Уравнение напряжения для короткозамкнутой обмотки фазы неподвижного ротора ($U_2 = 0$)

$$0 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 r_2. \quad (3.6)$$

Уравнение токов двигателя

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2), \quad (3.7)$$

где \dot{I}'_2 — приведенное значение тока ротора;

$$I'_2 = I_2 / k_i, \quad (3.8)$$

k_i — коэффициент трансформации тока, для трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора (см. рис. 3.2);

$$k_i = 2m_1 w_1 k_{\text{об1}} / m_2. \quad (3.9)$$

Здесь w_1 — число последовательно соединенных витков в обмотке фазы статора; $k_{\text{об1}}$ — обмоточный коэффициент обмотки статора, учитывающий особенность его конструкции (для двигателей малой мощности $k_{\text{об1}} = 0,95 \div 0,96$); m_2 — число фаз обмотки ротора, равное количеству стержней в короткозамкнутой обмотке Z_2 .

В уравнениях напряжений (3.5) и (3.6) индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора x_1 и ротора x_2 обусловлены магнитными потоками рассеяния статора и ротора соответственно. Электродвижущая сила обмотки фазы статора E_1 , наведенная основным вращающимся потоком Φ ,

$$E_1 = 4,44\Phi f_1 w_1 k_{\text{об1}}. \quad (3.10)$$

Электродвижущая сила обмотки фазы неподвижного ротора, наведенная основным потоком Φ ,

$$E_2 = 4,44\Phi f_1 w_2 k_{\text{об2}}, \quad (3.11)$$

где w_2 — число витков в обмотке фазы ротора (для короткозамкнутого ротора обмоткой фазы является стержень, у которого $w_2 = 0,5$).

В процессе работы асинхронного двигателя его ротор вращается в направлении вращения магнитного поля статора с частотой вращения $n_2 < n_1$; при этом основной вращающийся магнитный поток, обгоняя ротор с частотой скольжения $n_s = n_1 - n_2$, индуцирует в обмотке ротора ЭДС E_{2s} , частота которой $f_2 = s f_1$. Учитывая это, а также (3.11), ЭДС, наведенную в обмотке фазы вращающегося ротора, запишем в виде

$$E_{2s} = 4,44\Phi w_2 f_1 s = E_2 s, \quad (3.12)$$

где E_2 — ЭДС, наведенная основным вращающимся потоком в неподвижном роторе, т. е. при $s = 1$.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки вращающегося ротора также пропорционально скольжению $x_{2s} = x_2 s$. Учитывая все это, из (3.6) получим уравнение напряжения для вращающегося ротора

$$0 = \dot{E}_2 s - j \dot{I}_2 x_2 s - \dot{I}_2 r_2, \quad (3.13)$$

или, разделив уравнение на скольжение s , получим

$$0 = \dot{E}_2 - j \dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 r_2 / s. \quad (3.14)$$

Из уравнения токов асинхронного двигателя (3.7) следует, что ток статора I_1 имеет две составляющие: I_0 — ток намагничивания магнитной системы двигателя, не зависящий от нагрузки двигателя, т. е. $I_0 \approx \text{const}$; $(-I'_2)$ — ток, компенсирующий размагничивающее действие тока ротора и определяемый нагрузкой на валу асинхронного двигателя. Таким образом, любое изменение механической нагрузки на валу двигателя сопровождается соответствующим изменением тока ротора I_2 , а следовательно, и тока в обмотке статора I_1 за счет его составляющей $-I'_2 = -I_2/k_r$. Такое влияние механической нагрузки на валу двигателя на потребляемый из сети ток I_1 обусловлено тем, что изменение механической нагрузки вызывает изменение скольжения. Это, в свою очередь, влияет на ЭДС обмотки ротора $E_{2s} = E_2 s$ [см. (3.12)], а следовательно, и на ток ротора, выражение для которого получим из (3.14):

$$\dot{I}_2 = \dot{E}_2 / (j x_2 + r_2 / s). \quad (3.15)$$

Так, в режиме холостого хода (отсутствует механическая нагрузка на валу двигателя) скольжение $s \approx 0$, поэтому ток ротора $I_2 = 0$ и ток статора равен только намагничивающей составляющей $I_1 \approx I_0$. Если ротор двигателя неподвижен ($n_2 = 0$, $s = 1$), что соответствует начальному периоду пуска двигателя, то ЭДС ротора достигает наибольшего значения $E_{2s} = E_2$ и ток ротора максимален: $\dot{I}_2 = \dot{I}_{2k} = \dot{E}_2 / (j x_2 + r_2)$, что приводит к значительному увеличению тока статора:

$$\dot{I}_{1k} = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_{2k}), \text{ где } \dot{I}'_{2k} = \dot{I}_{2k} / k_r.$$

■ 3.4. Потери и коэффициент полезного действия асинхронного двигателя

Преобразование электрической энергии в механическую сопровождается потерями в электродвигателе. В асинхронном двигателе

Эти потери разделяются на магнитные, электрические, механические и добавочные.

Магнитные потери P_m обусловлены перемагничиванием сердечников вращающимся магнитным полем. Сердечник статора аналогичен магнитопроводу трансформатора (см. § 1.4) и перемагничивается с частотой сети f_1 , при этом учитывают потери на гистерезис P_r и вихревые токи $P_{вх}$, т. е. $P_m = P_r + P_{вх}$.

Для ослабления этих потерь сердечник статора выполняют шихтованным из тонких (0,5 или 0,35 мм) штампованных листов электротехнической стали, изолированных друг от друга тонким слоем изоляционного лака. Магнитные потери происходят также в сердечнике ротора, но они невелики и ими пренебрегают. Объясняется это тем, что частота перемагничивания сердечника ротора небольшая. Так, при частоте тока в сети $f_1 = 50$ Гц частота перемагничивания ротора $f_2 = sf_1$ даже при номинальной нагрузке двигателя не превышает 2—4 Гц.

Электрические потери P_z складываются из потерь в обмотках статора и ротора. Эти потери пропорциональны квадрату тока в соответствующей обмотке.

Электрические потери в обмотке статора, Вт,

$$P_{z1} = m_1 I_1^2 r_1, \quad (3.16)$$

в обмотке ротора, Вт,

$$P_{z2} = m_2 I_2^2 r_2. \quad (3.17)$$

В этих выражениях активные сопротивления обмоток статора r_1 и ротора r_2 должны быть приведены к рабочей температуре обмоток. Так как токи I_1 и I_2 в обмотках зависят от механической нагрузки на валу двигателя, то электрические потери P_{z1} и P_{z2} также зависят от нагрузки.

Электрические потери в обмотке ротора прямо пропорциональны скольжению:

$$P_{z2} = s P_{эм}, \quad (3.18)$$

где *электромагнитная мощность*, т. е. мощность, передаваемая через воздушный зазор δ между статором и ротором в ротор двигателя,

$$P_{эм} = P_1 - (P_m + P_{z1}), \quad (3.19)$$

активная мощность, потребляемая двигателем из сети,

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1; \quad (3.20)$$

$\cos \varphi_1$ — коэффициент мощности асинхронного двигателя.

Из (3.18) следует, что работа асинхронного двигателя наиболее экономична при малых скольжениях s , соответствующих минимальным электрическим потерям в обмотке ротора.

Механические потери $P_{мех}$ — это потери на трение в подшипниках и на вентиляцию (при самовентиляции двигателя). Они

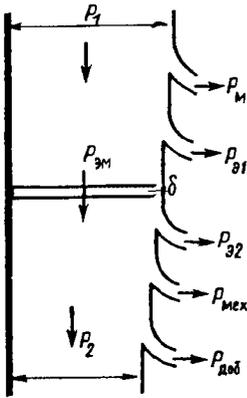


Рис. 3.6. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

пропорциональны квадрату частоты вращения ротора двигателя.

Добавочные потери $P_{доб}$ включают все виды трудно учитываемых потерь. Эти потери принимают равными 0,5% от подводимой к двигателю мощности

$$P_{доб} = 0,005P_1, \quad (3.21)$$

Добавочные потери зависят от нагрузки двигателя.

На рис. 3.6 представлена энергетическая диаграмма асинхронного двигателя, на которой все виды потерь условно показаны отводами от потока мощности P_1 , поступающей в двигатель из сети. Ширина диаграммы в верхней части эквивалентна мощности P_1 , в средней части — электромагнитной мощности $P_{эм}$ [см. (3.19)] и в нижней части — полезной механической мощности на валу двигателя:

$$P_2 = P_1 - \sum P, \quad (3.22)$$

где суммарные потери асинхронного двигателя, Вт,

$$\sum P = P_m + P_{31} + P_{32} + P_{мех} + P_{доб}. \quad (3.23)$$

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя

$$\eta = P_2/P_1 = (P_1 - \sum P)/P_1. \quad (3.24)$$

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя зависит от нагрузки. При номинальной или близкой к ней нагрузке КПД достигает наибольшего значения, при нагрузках меньших номинальных или перегрузках двигателя КПД уменьшается. Коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке зависит от мощности двигателей: у двигателей средней и большой мощности $\eta_{ном} = 0,88 \div 0,92$, у двигателей малой мощности (см. табл. 3.1) $\eta_{ном} = 0,5 \div 0,85$, у двигателей мощностью в несколько ватт $\eta_{ном} = 0,20 \div 0,30$.

■ 3.5. Электромагнитный момент асинхронного двигателя

Электромагнитный момент асинхронного двигателя пропорционален его электромагнитной мощности, $H \cdot м$:

$$M = P_{эм}/\omega_1, \quad (3.25)$$

где $\omega_1 = 2\pi f_1/p$ — угловая синхронная частота.

Электромагнитная мощность в соответствии с (3.17) и (3.18)

$$P_{эм} = P_{22}/s = m_2 I_2'^2 r_2'/s, \quad (3.26)$$

или

$$P_{эм} = m_1 I_2'^2 r_2'/s, \quad (3.27)$$

где r_2' — приведенное активное сопротивление обмотки ротора;

$$r_2' = r_2 k_z, \quad (3.28)$$

$k_z = m_1 w_1^2 k_{об1}^2 / (m_2 w_2^2 k_{об2}^2)$ — коэффициент приведения сопротивлений обмотки ротора.

Приведенный ток ротора прямо пропорционален напряжению сети. А:

$$I_2' = U_1 / \sqrt{(r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2}, \quad (3.29)$$

где $x_2' = x_2 k_z$ — приведенное индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора.

Используя (3.27) и (3.29), запишем зависимость электромагнитного момента асинхронного двигателя от скольжения, Н · м:

$$M = \frac{(m_1 p U_1^2 r_2'/s)}{\{2\pi f_1 [(r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2]\}}. \quad (3.30)$$

Так как параметры обмоток r_1 , r_2' , x_1 и x_2' при работе двигателя с различными частотами вращения ротора (скольжениями s) остаются приблизительно одинаковыми, а также неизменными остаются и параметры питающей сети U_1 и f_1 , то (3.30) дает возможность установить зависимость электромагнитного момента M от скольжения s . Графическая зависимость $M = f(s)$ представляет собой *механическую характеристику асинхронного двигателя* (рис. 3.7).

Анализ механической характеристики показывает, что при включении двигателя в сеть, когда вращающееся поле имеет частоту вращения n_1 , а ротор еще неподвижен ($n_2 = 0$, $s = 1$), на роторе создается

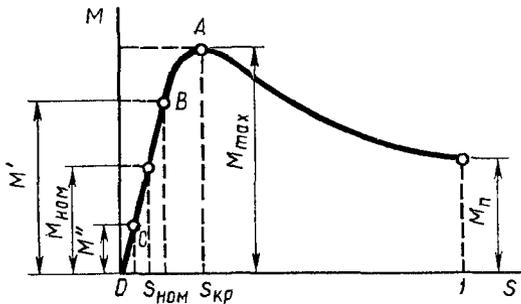


Рис. 3.7. Механическая характеристика асинхронного двигателя

начальный пусковой момент M_n , выражение для которого получим из (3.30) при $s = 1$:

$$M_n = \frac{m_1 p U_1^2 r_2'}{2\pi f_1 [(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2]}. \quad (3.31)$$

Под действием момента M_n ротор двигателя приводится во вращение, при этом скольжение уменьшается, а вращающий момент увеличивается. При критическом скольжении $s_{кр}$ момент достигает максимального значения. *Критическое скольжение* $s_{кр}$ пропорционально активному сопротивлению обмотки ротора:

$$s_{кр} \approx r_2' / (x_1 + x_2'). \quad (3.32)$$

Максимальный электромагнитный момент асинхронного двигателя, $H \cdot м$,

$$M_{\max} = \frac{m_1 p U_1^2}{2\pi f_1 [r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}]}. \quad (3.33)$$

После достижения моментом значения M_{\max} (рис. 3.7) частота вращения ротора продолжает увеличиваться, а момент — уменьшаться. Так продолжается до тех пор, пока электромагнитный момент M не станет равным сумме противодействующих моментов: $M = M_0 + M_2 = M_{ст}$, где M_0 — момент холостого хода, M_2 — полезный нагрузочный момент, создаваемый рабочей машиной, приводимой во вращение двигателем.

Пусть M_2 соответствует номинальной нагрузке двигателя, тогда установившийся режим работы двигателя определится точкой на механической характеристике с координатами $M = M_{ном}$ и $s = s_{ном}$, где $M_{ном}$ и $s_{ном}$ — номинальные значения электромагнитного момента и скольжения.

Из анализа механической характеристики следует, что устойчивая работа асинхронного двигателя будет при скольжениях $s < s_{кр}$, т. е. на участке *ОА* механической характеристики, где изменения нагрузки на валу двигателя сопровождаются соответствующими изменениями электромагнитного момента.

Так, если двигатель работал в режиме номинальной нагрузки, а затем нагрузочный момент M_2 на валу увеличился до M_2' , то равенство моментов нарушится ($M_{ном} < M_0 + M_2'$), частота вращения ротора начнет убывать, скольжение s — увеличиваться. Это приведет к росту электромагнитного момента до значения M' , равного сумме противодействующих моментов ($M' = M_0 + M_2'$), равновесие моментов восстановится. На рис. 3.7 этому режиму соответствует точка *В*. Если нагрузочный момент уменьшится до значения M_2'' , то равенство моментов вновь нарушится ($M' > M_0 + M_2''$). При этом частота n_2 вращения рото-

ра начнет увеличиваться, скольжение s — уменьшаться, что приведет к уменьшению электромагнитного момента до значения $M'' = M_0 + M_2''$, и изменение n_2 прекратится. На механической характеристике этому режиму соответствует точка С.

Работа асинхронного двигателя на рабочем участке механической характеристики OA , т. е. при $s < s_{кр}$, наиболее экономична, так как соответствует малым значениям скольжения, а следовательно, и небольшим электрическим потерям в обмотке ротора: $P_{э2} = sP_{эм}$.

Работа асинхронного двигателя при $s \geq s_{кр}$ становится *неустойчивой*, рост нагрузочного момента сопровождается уменьшением электромагнитного вращающего момента и ротор двигателя останавливается ($s = 1$), т. е. наступает режим короткого замыкания. Этот режим является аварийным, так как сопровождается недопустимым увеличением токов в обмотках двигателя. В режиме короткого замыкания должна сработать тепловая защита двигателя (плавкие предохранители или тепловое реле) и отключить его от сети. В противном случае чрезмерный перегрев обмотки статора вызовет загорание ее изоляции, что приведет к порче двигателя и опасности возникновения пожара.

Чтобы случайные кратковременные перегрузки и колебания питающего напряжения не привели к возникновению режима короткого замыкания, необходимо, чтобы асинхронные двигатели обладали *перегрузочной способностью*, которая определяется отношением максимального момента к номинальному: $\lambda = M_{\max} / M_{\text{ном}}$. Асинхронные двигатели общего назначения малой мощности имеют перегрузочную способность $\lambda = 2,0 \div 2,2$ (см. табл. 3.1).

■ 3.6. Влияние напряжения сети и активного сопротивления обмотки ротора на механическую характеристику

Из формул (3.30), (3.31), (3.33) следует, что электромагнитный момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения сети U_1 , подводимого к обмотке фазы статора ($M \sim U_1^2$). Анализ (3.32) показывает, что критическое скольжение не зависит от напряжения U_1 . Все это позволяет построить механические характеристики асинхронного двигателя $M = f(s)$ для различных значений напряжения: $U_1 = U_{\text{ном}}$, $U_1' < U_{\text{ном}}$, $U_1'' > U_{\text{ном}}$ (рис. 3.8), из которых видно, что колебания напряжения U_1 относительно его номинального значения сопровождаются изменениями максимального M_{\max} , M'_{\max} , M''_{\max} и пускового $M_{п}$, $M'_п$, $M''_п$ моментов, а также скольжения s_1 , s'_1 , s'' и частоты вращения ротора.

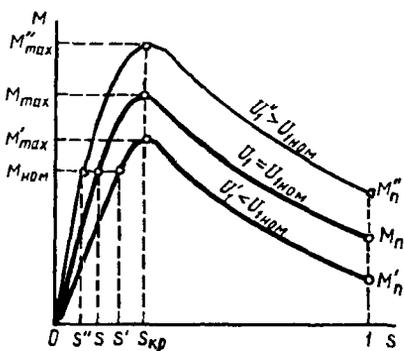


Рис. 3.8. Механические характеристики асинхронного двигателя при различных напряжениях сети

Перегрузочная способность асинхронного двигателя изменяется пропорционально квадрату напряжения питающей сети U_1 , т. е. она очень чувствительна к колебаниям напряжения сети. Например, если напряжение сети уменьшится до $0,8U_{ном}$, то перегрузочная способность уменьшится в $0,8^2 = 0,64$ раза.

Рассмотрим влияние активного сопротивления обмотки ротора r'_2 на форму механической характеристики асинхронного двигателя. Из (3.33) следует, что максимальный момент

M_{max} не зависит от активного сопротивления r'_2 , критическое скольжение $s_{кр}$ пропорционально сопротивлению r'_2 [см. (3.32)]. На рис. 3.9 изображено несколько механических характеристик $M = f(s')$ асинхронного двигателя для ряда нарастающих значений активного сопротивления ротора $r'_{21} < r'_{22} < r'_{23} < r'_{24}$. Все характеристики имеют одинаковую амплитуду ($M_{max} = const$), но разные $s_{кр}$. С увеличением r'_2 до определенного значения (r'_{23}) начальный пусковой момент возрастает до максимального значения $M_{н3} = M_{max}$; при этом скольжение s , соответствующее заданному нагрузочному моменту M_2 , возрастает ($s_1 < s_2 < s_3 < s_4$), а частота вращения ротора уменьшается [см. (3.3)].

Таким образом, изменяя активное сопротивление в цепи ротора, можно влиять на основные свойства асинхронного двигателя — частоту вращения и начальный пусковой момент. В асинхронных двигателях с фазным ротором регулирование сопротивления цепи ротора осуществляется введением в цепь ротора добавочного активного сопротивления $R_{доб}$ (см. рис. 3.5, б).

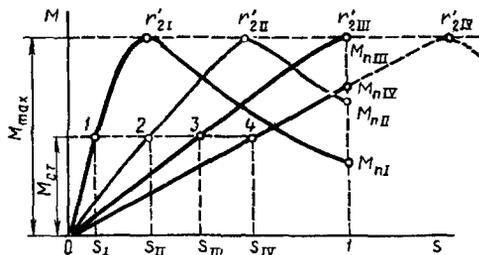


Рис. 3.9. Механические характеристики асинхронного двигателя при различных активных сопротивлениях в обмотках ротора

3.7. Рабочие характеристики трехфазных асинхронных двигателей

Рабочие характеристики асинхронного двигателя (рис. 3.10) представляют собой зависимость частоты вращения ротора n_2 , полезного (нагрузочного) момента на валу M_2 , тока статора I_1 , коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ и КПД η от полезной мощности двигателя P_2 .

Зависимость частоты вращения $n_2 = f(P_2)$ имеет вид кривой, слабо наклоненной к оси абсцисс. Такая форма графика объясняется тем, что трехфазные асинхронные двигатели работают с небольшим скольжением, которое даже при номинальной нагрузке не превышает 0,02—0,08. При этом частота вращения ротора с ростом нагрузки уменьшается пропорционально величине $(1-s)$ [см. (3.3)].

Зависимость полезного момента $M_2 = f(P_2)$ определяется выражением

$$M_2 = P_2 / \omega_2 = 30P_2 / (\pi n_2), \quad (3.34)$$

где $\omega_2 = 2\pi n_2 / 60$ — угловая частота вращения ротора.

Так как с ростом P_2 частота вращения n_2 уменьшается, график зависимости $M_2 = f(P_2)$ несколько отклоняется от прямой линии.

Зависимость тока статора $I_1 = f(P_2)$ представляет собой график, не выходящий из начала осей координат, так как двигатель в режиме холостого хода ($P_2 = 0$) потребляет из сети ток холостого хода I_0 , значение которого у асинхронных двигателей больше, чем у трансформаторов, что объясняется наличием у двигателя воздушного зазора

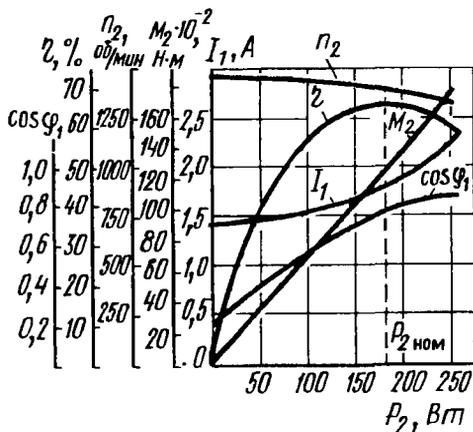


Рис. 3.10. Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя типа АОЛ12-4: $P_{\text{ном}} = 180$ Вт $U_1 = 220/127$ В, $n_{\text{ном}} = 1400$ об/мин

между статором и ротором и механических потерь. Ток холостого хода у асинхронных двигателей малой мощности достигает 30—50% и более от номинального тока статора.

Зависимость коэффициента мощности $\cos \varphi_2 = f(P_2)$ показывает, что коэффициент мощности изменяется в значительном диапазоне при переходе двигателя от режима холостого хода к номинальному. Это объясняется тем, что при любой нагрузке, так же как и в режиме холостого хода, при $M_2 = 0$ двигатель потребляет из сети намагничивающий (реактивный) ток приблизительно одинаковой величины. Поэтому при небольших нагрузках потребляемый из сети ток I_1 имеет значительную реактивную составляющую, и это является причиной низкого коэффициента $\cos \varphi_1 = (0,2 \div 0,3)$. С возрастанием нагрузки увеличивается активная составляющая тока I_1 и коэффициент мощности повышается, достигая при номинальной нагрузке значений 0,6—0,85. При перегрузках двигателя заметно повышается скольжение s и $\cos \varphi_1$ уменьшается. Объясняется это тем, что с ростом скольжения s увеличивается частота тока в роторе $f_2 = f_1 s$, и соответственно индуктивное сопротивление рассеяния $x_{2s} = x_{2s}$.

Иногда с целью повышения коэффициента мощности двигателя, работающего при значительной недогрузке, его обмотки статора соединяют звездой.

Зависимость КПД $\eta = f(P_2)$ имеет вид, характерный для электрических машин и трансформаторов: при малых нагрузках КПД небольшой, а затем с ростом нагрузки до $P_2 = (0,7 \div 1,0)P_{\text{ном}}$ достигает максимального значения.

■ 3.8. Пусковые свойства трехфазных асинхронных двигателей

Пусковые свойства двигателей характеризуются пусковым током $I_{1п}$ или его кратностью $I_{1п} / I_{1\text{ном}}$ и начальным пусковым моментом $M_{п}$ или его кратностью $M_{п} / M_{1\text{ном}}$. Анализируя формулы для пускового тока

$$I_{1п} = U_1 / \sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2} \quad (3.35)$$

и пускового момента (3.31), делаем следующие выводы.

1. Уменьшение подводимого к двигателю напряжения U_1 способствует не только снижению пускового тока, но и значительному уменьшению пускового момента; объясняется это тем, что $I_{п} \sim U_1$, а $M_{п} \sim U_1^2$.

2. Увеличение на время пуска трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором активного сопротивления цепи обмотки рото-

ра — эффективное средство улучшения пусковых свойств, так как в этом случае уменьшение пускового тока сопровождается ростом пускового момента (см. рис. 3.9), при этом можно увеличивать пусковой момент до максимального значения.

У трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором мощностью менее 1 кВт кратность пускового тока не превышает 2,5—4,5. Учитывая небольшое значение номинального тока статора, пусковой ток при такой кратности не достигнет значений, способных вызвать нежелательные явления в питающей сети либо в двигателе. Поэтому при пуске асинхронных двигателей малой мощности обычно не применяют специальных мер для ограничения пускового тока. При пуске двигателей мощностью более 1 кВт, кратность пускового тока которых 5,5—7,5, иногда применяют меры по ограничению пускового тока путем снижения напряжения на время пуска двигателя при условии, что нагрузочный момент в этом интервале времени невелик [5].

При пуске двигателя с фазным ротором (см. § 3.2) в каждую обмотку фазы ротора через контактные кольца и щетки включают добавочное сопротивление в виде пускового реостата ПР (см. рис. 3.5, б), что уменьшает пусковой ток и увеличивает пусковой момент. По мере разгона ротора переключают ступени реостата ПР и постепенно уменьшают его сопротивление. По окончании пуска сопротивление реостата ПР уменьшают до $R_{\text{доб}} = 0$ и двигатель работает с короткозамкнутым ротором.

■ 3.9. Регулирование частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей

Из формулы (3.3) следует, что частоту вращения трехфазных асинхронных двигателей можно регулировать, изменяя скольжение s , частоту тока в цепи статора f_1 или число пар полюсов обмотки статора p .

Рассмотрим некоторые способы регулирования частоты вращения.

Регулирование частоты вращения изменением активного сопротивления в цепи ротора. Этот способ используется только в асинхронных двигателях с фазным ротором и основан на изменении скольжения путем введения в цепь ротора регулировочного реостата. Механические характеристики асинхронного двигателя для различных значений активного сопротивления цепи ротора (см. рис. 3.9) показывают, что с увеличением активного сопротивления скольжение возрастает и соответствует заданному нагрузочному моменту M_2 , а частота вращения ротора — уменьшается.

Зависимость скольжения (частоты вращения ротора) от активного сопротивления цепи ротора

$$s = m_2 I_2^2 (r_2 + R_{\text{доб}}) / (\omega_1 M), \quad (3.36)$$

где $R_{\text{доб}}$ — сопротивление регулировочного реостата.

Недостатки способа: большие потери энергии в $R_{\text{доб}}$, увеличение потерь энергии в обмотке ротора, вызванное повышением скольжения s , ограниченная область применения (только для двигателей с фазным ротором), возможность регулирования частоты вращения ротора только на сторону уменьшения от номинальной.

Использование данного способа позволяет обеспечить плавность регулирования частоты вращения двигателя в широком диапазоне

Регулирование частоты вращения изменением частоты тока в цепи статора (частотное регулирование). При этом способе регулирования необходим источник питания с регулируемой частотой напряжения на выходе. Для этого наиболее часто используют источники переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты, которые позволяют одновременно регулировать частоту тока и величину напряжения источников. Необходимость этого обусловлена тем, что с изменением частоты f_1 изменяются индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора, а следовательно, и электромагнитный момент двигателя [см. (3.30)]. Поэтому для сохранения на требуемом уровне перегрузочной способности, коэффициента мощности и КПД двигателя необходимо, чтобы изменения частоты f_1 и напряжения U_1 происходили в соответствии с формулой

$$U'_1 / U_1 = (f'_1 / f_1) \sqrt{M'_2 / M_2}, \quad (3.37)$$

где U_1 и M_2 — напряжение и нагрузочный момент при частоте тока f_1 ; U'_1 и M'_2 — напряжение и нагрузочный момент при частоте тока f'_1 .

Если частота вращения двигателя регулируется при условии постоянства нагрузочного момента ($M_2 = M'_2 = \text{const}$), то подводимое к двигателю напряжение необходимо изменять пропорционально изменению частоты тока:

$$U'_1 = U_1 f'_1 / f_1. \quad (3.38)$$

Частотное регулирование позволяет плавно изменять частоту вращения ротора двигателя в широком диапазоне. Однако источники питания с регулируемой частотой тока и напряжением усложняют и удорожают установку. Такой способ регулирования наиболее часто используют при работе двигателя в пожаро- или взрывоопасных средах (химическая и нефтеперерабатывающая промышленности), где применение коллекторных двигателей с хорошими регулировочными свойствами (см гл. 6) недопустимо из-за наличия щеточного контакта — источника искробразования.

Регулирование частоты вращения изменением числа полюсов обмотки статора. Этот способ регулирования дает ступенчатое изменение частоты вращения и применяется в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором. Обмотка статора этих двигателей

имеет конструкцию, позволяющую путем переключения менять в ней число полюсов $2p$. Такие двигатели называются многоскоростными, они могут изготавливаться на две, три или четыре синхронные частоты вращения. Например, четырехскоростной двигатель имеет такую конструкцию обмотки статора, при которой можно путем переключения получить восемь, шесть, четыре, два полюса. При 50 Гц в двигателе можно получить синхронные частоты вращения соответственно 750, 1000, 1500 и 3000 об/мин.

Так как полезная мощность асинхронного двигателя пропорциональна частоте вращения ротора

$$P_2 = M_2 \omega_2 = (\pi/30) M_2 n_2, \quad (3.39)$$

то при переключении обмотки статора с большего числа полюсов на меньшее, т. е. при переходе с меньшей частоты вращения на большую, номинальная мощность двигателя возрастает. Это подтверждается данными табл. 3.2, где приведены технические данные многоскоростных трехфазных асинхронных двигателей малой мощности серии 4А.

Таблица 3.2

Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Синхронные частоты вращения, об/мин	Число полюсов
4AA56A4/2	0,10/0,14	1500/3000	4/2
4AA56B4/2	0,12/0,18	1500/3000	4/2
4AA63A4/2	0,19/0,265	1500/3000	4/2
4AA63B4/2	0,224/0,37	1500/3000	4/2
4AA71A4/2	0,45/0,75	1500/3000	4/2
4A90L8/4	0,63/1,0	750/1500	8/4
4A 100S8/6	0,70/90	750/1000	8/6
4A 100S8/6/4	0,71/0,90/1,3	750/1000/1500	8/6/4
4A 100S8/6/4/2	0,5/0,63/0,9/1,1	750/1000/1500/3000	8/6/4/2

Многоскоростные асинхронные двигатели по сравнению с обычными (односкоростными) имеют большие габаритные размеры, массу и стоимость.

Импульсное регулирование частоты вращения. Импульсный способ регулирования применяют для трехфазных асинхронных двигателей небольшой мощности. При этом способе изменение частоты вращения двигателя достигается за счет изменения времени, в течение которого к обмотке статора двигателя подводится напряжение сети. К двигателю подводится последовательно импульсов напряжения, в результате чего работа двигателя представляет собой чередование периодов разгона ротора (при подаче импульса) и его торможения (при прекращении импульса).

Рассмотрим принцип импульсного регулирования с помощью схемы рис. 3.11, а. Периодическое подключение трехфазного асинхронного двигателя к сети с напряжением U_1 осуществляется посред-

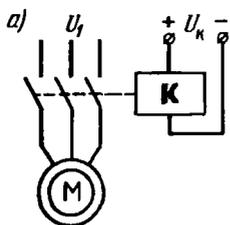
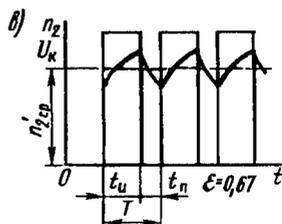
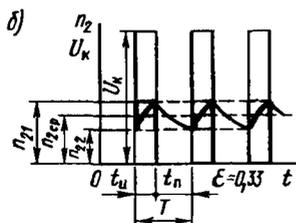


Рис. 3.11. Принципиальная схема (а) и графики $n = f(t)$, $U_k = f(t)$ (б, в) при импульсном регулировании трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором



ством контактора K , на обмотку которого подаются управляющие импульсы постоянного напряжения U_k продолжительностью t_u , они чередуются с паузами t_n (рис. 3.11, б). Отрезок времени от момента подачи одного импульса до подачи следующего называется периодом $T = t_u + t_n$. Если принять, что время срабатывания и время отпускания контактора равны нулю, то график изменения частоты вращения ротора двигателя можно совместить с графиком чередования импульсов U_k .

За время t_u частота вращения нарастает до значения n_{21} , за время паузы t_n — убывает до n_{22} . В итоге ротор вращается с некоторой средней частотой вращения, об/мин,

$$n_{2cp} = (n_{21} + n_{22})/2. \quad (3.40)$$

Средняя частота вращения зависит от относительной продолжительности включения $\epsilon = t_u/T$: чем больше ϵ , тем больше частота вращения n_{2cp} . При увеличении относительной продолжительности включения от 0,33 (рис. 3.11, б) до 0,67 (рис. 3.11, а) средняя частота вращения увеличивается от n_{2cp} до n'_{2cp} .

При импульсном регулировании мгновенные значения частоты вращения непрерывно колеблются в пределах от n_{21} до n_{22} . Диапазон таких колебаний $\Delta n_2 = n_{21} - n_{22}$ тем меньше, чем больше момент инерции вращающихся масс (ротора и рабочей машины) и чем больше частота следования импульсов U_k .

При неизменном $\epsilon = t_u/T$ среднее значение частоты вращения n_{2cp} зависит от момента нагрузки на валу двигателя и от питающего напряжения U_1 .

Применение контактных устройств для импульсного регулирования не обеспечивает достаточной надежности работы электропривода

из-за сравнительно быстрого выхода из строя контактов, коммутирующих силовую цепь двигателя. Поэтому целесообразно применять бесконтактные коммутирующие устройства, например магнитные усилители или тиристоры.

■ 3.10. Асинхронные двигатели специального назначения

Помимо асинхронных двигателей общего назначения, составляющих основу современного электропривода, в последние годы все более широкое применение получают асинхронные двигатели специального назначения. Применение таких двигателей позволяет упростить электропривод и придать ему некоторые специфические свойства, которые двигателями общего назначения не обеспечиваются. Для двигателей специального назначения характерна нетрадиционность их конструкции. К таким двигателям относятся двигатели с внешним ротором и линейные асинхронные двигатели.

Асинхронные двигатели с внешним ротором. Эти двигатели отличаются от ранее рассмотренных тем, что их статор (неподвижная часть) находится внутри ротора (вращающейся части). Такую конструкцию иногда называют обращенной. По принципу действия эти двигатели не отличаются от асинхронных двигателей общего назначения, т. е. от двигателей с внутренним ротором.

Асинхронный двигатель с внешним ротором (рис. 3.12) состоит из шихтованного сердечника статора 10, собранного на втулке 9, которая напрессована на стальную невращающуюся ось 7. Трехфазная обмотка статора 6 имеет три вывода 1, которые проходят через полую часть 2 оси 7. Внешний ротор состоит из шихтованного сердечника 4, в пазах которого расположены стержни обмотки, замкнутые с двух сторон замыкающими кольцами. Наружная поверхность ротора образована ободом 11, форма которого зависит от назначения двигателя, т. е. он может быть колесом, шкивом, роликом или просто массивным элементом —

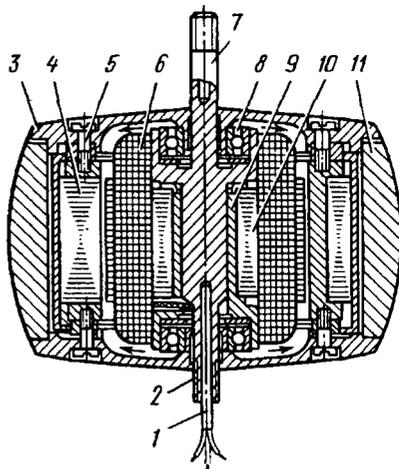


Рис. 3.12. Устройство трехфазного асинхронного двигателя с внешним ротором

маховиком. С двух сторон обод закреплен крышками 3 посредством винтов 5. Крышки 3 сочленяются с подшипниками 8.

Асинхронные двигатели с внешним ротором применяют в электроинструменте, в рольганге на металлургических предприятиях (внешний ротор двигателя — это вращающийся ролик рольганга), в качестве двигателя-маховика для привода устройств, требующих равномерного вращения при неравномерной нагрузке на вал.

Однако самое широкое применение эти двигатели получили в гироскопических приборах в качестве *гиродвигателей*. Гироскопические приборы составляют основу навигационной техники в судостроении, авиации и ракетостроении. Основным элементом гироскопического прибора — гироскоп, т. е. массивный цилиндрический ротор. Приведенный в быстрое вращение, этот ротор сохраняет неизменным положение в пространстве своей оси вращения. Чем больше частота вращения ротора, тем эффективнее проявляется это свойство.

Основное требование к гиродвигателю состоит в создании большого кинетического момента, $H \cdot m \cdot c$:

$$M_{\text{кин}} = J_2 \omega_2, \quad (3.41)$$

где J_2 — момент инерции ротора, $H \cdot m \cdot c^2$; ω_2 — угловая скорость ротора, $1/c$.

Гиродвигатели для обеспечения большого момента инерции J_2 изготавливают с внешним ротором, а для получения большой угловой скорости ω_2 их питают от сети переменного тока частотой $f_1 = 400 \div 2000$ Гц при числе полюсов обмотки статора $2p = 4$ или 8. Обмотку ротора гиродвигателей выполняют с малым активным сопротивлением, что определяет работу двигателя с небольшим скольжением ($s = 0,02 \div 0,05$). Это необходимо для получения жесткой механической характеристики, т. е. возможные колебания питающего напряжения и нагрузки не будут сопровождаться значительными изменениями частоты вращения ротора.

Линейные асинхронные двигатели. Во многих производственных механизмах, транспортных средствах и приборных устройствах рабочий орган совершает поступательное или возвратно-поступательное движение. Для привода этих устройств и механизмов используют двигатели с вращательным движением ротора и промежуточным кинематическим звеном для преобразования вращательного движения в линейное. Такое звено усложняет привод, вызывает дополнительные потери мощности, снижает КПД и надежность. Кинематика привода указанных устройств упрощается, если использовать линейный электродвигатель, у которого подвижная часть совершает поступательное или возвратно-поступательное движение. Наибольшее применение получили линейные асинхронные двигатели (ЛАД).

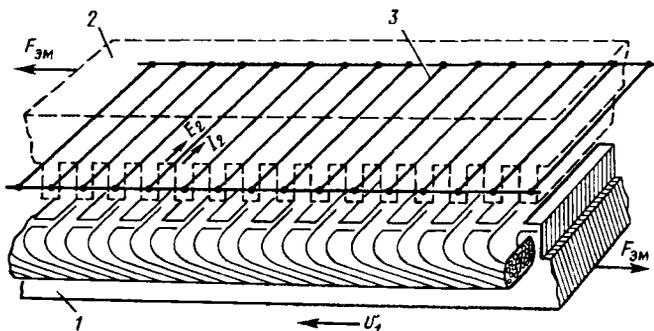


Рис. 3.13. Электромагнитная схема линейного асинхронного двигателя

Принцип действия ЛАД основан на способности многофазной (трехфазной) системы токов создавать бегущее магнитное поле. Если в обычном асинхронном двигателе статор цилиндрической формы разрезать вдоль его оси и развернуть в плоскость (рис. 3.13), то получим статор линейного двигателя, называемый индуктором 1. Если обмотку индуктора соединить звездой или треугольником и включить в трехфазную сеть, то возникает магнитное поле, ось которого будет перемещаться вдоль развернутой поверхности сердечника индуктора с синхронной скоростью v_1 . Такое магнитное поле называют *бегущим*.

Синхронная скорость бегущего поля пропорциональна частоте тока f_1 и длине индуктора L_n и обратно пропорциональна числу пар полюсов в обмотке индуктора p :

$$v_1 = f_1 L_n / p. \quad (3.42)$$

Вблизи индуктора, параллельно ему, расположен вторичный элемент, состоящий из магнитопровода 2 (на рис. 3.13 показан пунктирными линиями), в пазы которого заложены алюминиевые или медные стержни 3 короткозамкнутой обмотки. Бегущее поле индуктора, сцепляясь со стержнями 3 короткозамкнутой обмотки, будет наводить в них ЭДС E_2 , которая создаст токи I_2 . Взаимодействуя с бегущим магнитным полем, эти токи создают электромагнитные силы $F_{эм}$, стремящиеся сместить магнитопроводы индуктора и вторичного элемента относительно друг друга в противоположных направлениях. Если один из магнитопроводов, например индуктора, закрепить неподвижно, то другой магнитопровод, называемый в этом случае бегунком, будет линейно перемещаться относительно первого в направлении движения бегущего поля. В итоге электроэнергия, поступающая в обмотку индуктора из сети, будет преобразовываться в механическую энергию линейного (поступательного) движения.

Если неподвижным сделать вторичный элемент, то бегунком станет индуктор, который будет перемещаться линейно в направлении, противоположном движению создаваемого им бегущего поля.

Электромагнитная сила, вызывающая линейное перемещение бегунка линейного двигателя, прямо пропорциональна числу пар полюсов обмотки индуктора p , току вторичного элемента I_2 и бегущему магнитному полю Φ_2 :

$$F_{эм} = c_m p I_2 \Phi_2 \cos \psi_2, \quad (3.43)$$

где c_m — постоянный коэффициент, определяемый конструкцией линейного двигателя; ψ_2 — угол сдвига фаз между ЭДС \dot{E}_2 и током \dot{I}_2 во вторичном элементе двигателя.

Скорость движения бегунка v_2 всегда меньше скорости бегущего поля v_1 , так как только в этом случае в обмотке вторичного элемента ЛАД наводится ЭДС. Таким образом, в ЛАД, так же как и в двигателях с вращательным движением ротора, скольжение s характеризует отставание подвижной части двигателя от бегущего поля:

$$s = (v_1 - v_2)/v_1. \quad (3.44)$$

Имеются конструкции ЛАД, в которых в качестве вторичного элемента используется полоса из меди, алюминия или стали, обладающей ферромагнитными свойствами. Возможно применение составного вторичного элемента, например полосы из ферромагнитной стали, покрытой слоем меди.

Линейные асинхронные двигатели используют для привода за-слонков, подъемно-транспортных средств, металлообрабатывающих станков, в электроприводе манипуляторов (роботов) и во многих других случаях, где рабочий орган должен совершать поступательное или возвратно-поступательное движение. Рассмотрим несколько при-

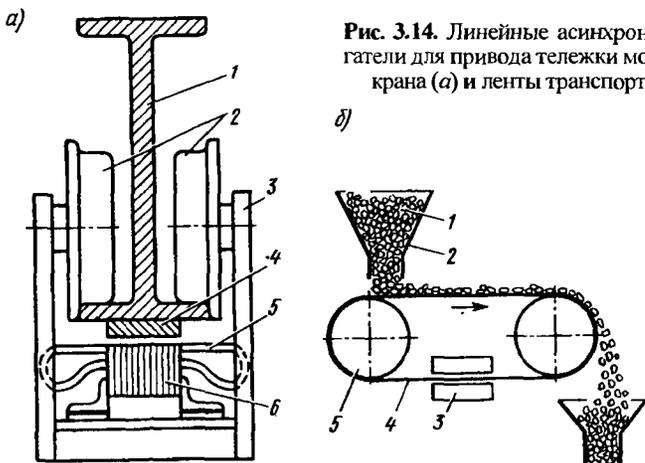


Рис. 3.14. Линейные асинхронные двигатели для привода тележки мостового крана (а) и ленты транспортера (б)

меров практического применения ЛАД. На рис. 3.14, а показано устройство привода тележки мостового крана с ЛАД. На тележке 3 расположен индуктор линейного двигателя, состоящий из шихтованного сердечника 6, в пазах которого расположена обмотка 5. Направляющая для колес 2 представляет собой стальную балку 1, к нижней части которой прикреплена стальная полоса 4 — вторичный элемент ЛАД.

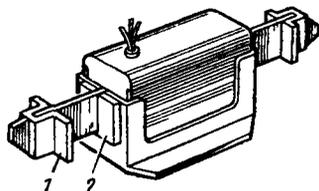


Рис. 3.15. Линейный асинхронный двигатель возвратно-поступательного движения

На рис. 3.14, б показан пример применения ЛАД для привода ленточного конвейера, транспортирующего сыпучие материалы 1 из бункера 2. Груз переносится металлической лентой 4, укрепленной на вращающихся барабанах 5. Металлическая лента — вторичный элемент ЛАД. Электромагнитное усилие, приводящее ленту в движение, возникает на участке ленты, проходящем в воздушном зазоре между двумя индукторами 3.

В ЛАД с возвратно-поступательным движением, которые получили наибольшее применение для привода производственных механизмов и станков, изменяется направление бегущего поля индуктора в момент окончания движения бегунка в одном из направлений. Для этого необходимо изменять порядок чередования фаз питающего напряжения. Для торможения бегунка в конце хода применяют ограничительные пластины на бегунке 1 и индукторе 2 (рис. 3.15). Иногда между этими пластинами располагают пружины.

Примеры использования линейных двигателей в металлообрабатывающих станках — привод стола плоскошлифовального станка или привод стола продольно-строгального станка.

Недостатки линейных асинхронных двигателей: явление краевого эффекта, трудность увеличения электромагнитного усилия, создаваемого двигателем. Явление краевого эффекта представляет собой комплекс электромагнитных процессов, обусловленных разомкнутой конструкцией статора (индуктора). Нежелательные последствия краевого эффекта — появление «паразитных» тормозных усилий, направленных встречно движению подвижной части двигателя; возникновение поперечных сил, стремящихся сместить подвижную часть двигателя в поперечном направлении. Краевой эффект вызывает ряд других нежелательных явлений, ухудшающих рабочие характеристики линейных двигателей. В двигателях с вращательным движением ротора электромагнитный момент, развиваемый двигателем, усиливается применением редуктора, понижающего частоту вращения. В ЛАД увеличение силы, действующей на рабочий орган машины, возможно лишь посредством рычага (системы рычагов), с большим плечом на сто-

роне двигателя. Однако это усложняет привод и лишает его главного достоинства, которое достигается заменой двигателя с вращательным движением ротора на линейный двигатель.

В линейных двигателях возвратно-поступательного движения возникают неблагоприятные условия работы, вызванные чередованием циклов разгона в начале движения бегунка и торможения в конце его движения. Поэтому целесообразно регулировать скорость, изменяя частоту питающего напряжения f_1 . Применяемые для этого регуляторы частоты должны обеспечивать оптимальный закон изменения частоты, соответствующий минимальным потерям в переходных режимах разгона и торможения.

Контрольные вопросы

1. Почему частота вращения ротора асинхронного двигателя меньше синхронной?
2. Какое скольжение называют номинальным?
3. Почему с увеличением механической нагрузки на вал асинхронного двигателя возрастает потребляемый двигателем ток?
4. Как влияет напряжение сети на перегрузочную способность асинхронного двигателя?
5. Какие существуют способы регулирования частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей? Дайте их сравнительную оценку.

Глава 4

Однофазные и конденсаторные асинхронные двигатели

■ 4.1. Принцип действия однофазного асинхронного двигателя

Однофазные асинхронные двигатели — это обычные двигатели небольшой мощности, широко применяемые в устройствах автоматики и различных бытовых приборах. По конструкции они почти не отличаются от трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Различие состоит в том, что на сердечнике статора однофазного двигателя уложена однофазная обмотка, занимающая $2/3$ пазов сердечника.

При включении однофазной обмотки статора C1—C2 в сеть (рис. 4.1) переменный ток, проходя по обмотке, создает пульсирующий магнитный поток, неподвижный в пространстве, но изменяющийся от $+\Phi_{\max}$ до $-\Phi_{\max}$. Для объяснения принципа действия однофазного асинхронного двигателя воспользуемся графическим методом разложения пульсирующего магнитного потока на два одинаковых, равных $\Phi_{\max}/2$, магнитных потока $\Phi_{\text{пр}}$ и $\Phi_{\text{обр}}$, вращающихся в разные стороны с одинаковой частотой (рис. 4.2), об/мин:

$$n_{\text{пр}} = n_{\text{обр}} = f_1 \cdot 60 / p = n_1. \quad (4.1)$$

Считаем поток $\Phi_{\text{пр}}$, вращающийся в направлении вращения ротора, прямым, а поток $\Phi_{\text{обр}}$ — обратным. Допустим, что ротор двигателя вращается против часовой стрелки, т. е. в направлении потока $\Phi_{\text{пр}}$. Частота вращения ротора n_2 меньше частоты вращения магнитного потока n_1 , поэтому скольжение ротора относительно потока $\Phi_{\text{пр}}$

$$s_{\text{пр}} = (n_1 - n_2) / n_1 = s. \quad (4.2)$$

Магнитный поток $\Phi_{\text{обр}}$ вращается встречно ротору, поэтому частота вращения ротора n_2 относительно этого потока отрицательна, а скольжение ротора относительно $\Phi_{\text{обр}}$

$$s_{\text{обр}} = \frac{n_1 - (-n_2)}{n_1} = \frac{n_1 + n_2}{n_1} = \frac{n_1 + n_1 - n_1 + n_2}{n_1} = 2 - s_{\text{пр}}. \quad (4.3)$$

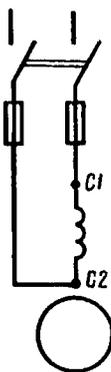


Рис. 4.1. Схема включения однофазного асинхронного двигателя

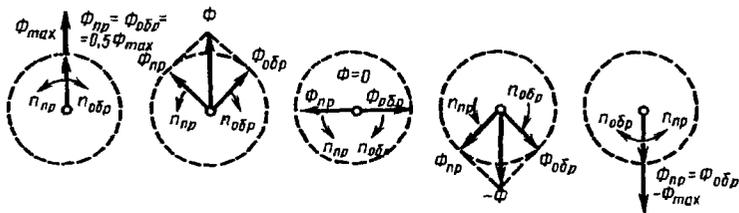


Рис. 4.2. Разложение пульсирующего магнитного поля на два вращающихся

Прямой Φ_{np} и обратный $\Phi_{обр}$ магнитные потоки наводят в обмотке ротора ЭДС E_{2np} и $E_{2обр}$, которые создают в короткозамкнутом роторе соответственно токи I_{2np} и $I_{2обр}$.

Частота тока в роторе пропорциональна скольжению [см. (3.4)], следовательно,

$$f_{2n} = f_1 s_{np}; f_{2обр} = f_1 s_{обр} = f_1 (2 - s_{np}). \quad (4.4)$$

Таким образом, ток $I_{2обр}$, наводимый обратным магнитным потоком в обмотке ротора, имеет частоту $f_{2обр}$, намного превышающую частоту f_{2np} тока ротора I_{2np} , наведенного прямым потоком. Например, для однофазного асинхронного двигателя, работающего от сети с частотой $f_1 = 50$ Гц при $n_1 = 1500$ и $n_2 = 1440$ об/мин,

$$s_{np} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0,04; \quad f_{2np} = 50 \cdot 0,04 = 2 \text{ Гц};$$

$$s_{обр} = 2 - s_{np} = 2 - 0,04 = 1,96; \quad f_{2обр} = 50 \cdot 1,96 = 98 \text{ Гц}.$$

В результате взаимодействия тока I_{2np} с магнитным потоком Φ_{np} возникает электромагнитный момент

$$M_{np} = c_m \Phi_{np} \cos \varphi_{2np}, \quad (4.5)$$

где c_m — постоянный коэффициент, определяемый конструкцией двигателя.

Ток $I_{2обр}$, взаимодействуя с магнитным потоком $\Phi_{обр}$, создает электромагнитный момент $M_{обр}$, направленный встречно M_{np} , т. е. против вращения ротора;

$$M_{обр} = c_m \Phi_{обр} I_{2обр} \cos \varphi_{2обр}. \quad (4.6)$$

Результирующий электромагнитный момент, действующий на ротор однофазного асинхронного двигателя, $M = M_{np} - M_{обр}$.

При небольших значениях скольжения $s = s_{np}$, т. е. при работе двигателя в пределах номинальной нагрузки, электромагнитный момент создается в основном за счет M_{np} . Тормозящее действие момента обратного поля $M_{обр}$ — незначительно. Объясняется это тем, что $f_{2обр} \gg f_{2np}$, следовательно, индуктивное сопротивление рассеяния

обмотки ротора $x_{2обр} = x_2 s_{обр}$ току $I_{2обр}$ намного больше его активного сопротивления. Поэтому ток $I_{2обр}$, имеющий большую индуктивную составляющую, оказывает сильное размагничивающее действие на обратный магнитный поток $\Phi_{обр}$, значительно ослабляя его. Если учесть, что коэффициент мощности

$$\cos \varphi_{2обр} = r_2 / \sqrt{r_2^2 + x_{2обр}^2} \quad (4.7)$$

невелик, то станет ясно, почему $M_{обр}$ в режиме нагрузки двигателя [см. (4.6)] не оказывает значительного тормозящего действия на ротор однофазного двигателя.

На рис. 4.3 показаны графики зависимостей электромагнитных моментов от скольжения для однофазного двигателя. График результирующего момента $M = f(s_{пр})$ получен вычитанием ординат моментов $M_{пр}$ и $M_{обр}$. При неподвижном роторе ($n_2 = 0$) скольжение $s_{пр} = s_{обр} = 1$ и $M_{пр} = M_{обр}$, поэтому начальный пусковой момент однофазного асинхронного двигателя $M_n = 0$. Для создания пускового момента необходимо привести ротор во вращение в ту или иную сторону. Тогда $s \neq 1$, равенство моментов $M_{пр}$ и $M_{обр}$ нарушается и результирующий электромагнитный момент приобретает некоторое значение $M = M_{пр} - M_{обр} \neq 0$.

4.2. Пуск однофазного асинхронного двигателя

Для создания пускового момента в однофазном асинхронном двигателе необходимо, чтобы обмотка статора создавала вращающееся магнитное поле, которое можно получить, если на статоре двигателя помимо основной (рабочей) обмотки A , занимающей $2/3$ пазов сердечника, в оставшихся $1/3$ пазов расположить вспомогательную (пусковую) обмотку B . При этом оси обмоток должны быть смещены в пространстве относительно друг друга на угол 90 эл. град (рис. 4.4),

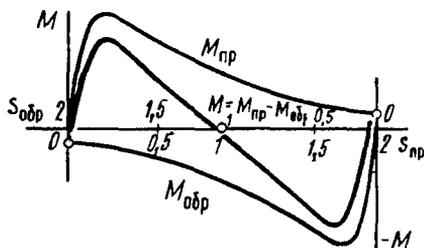


Рис. 4.3. Графики зависимости электромагнитных моментов однофазного асинхронного двигателя от скольжения

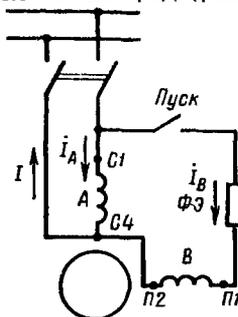


Рис. 4.4. Принципиальная схема однофазного асинхронного двигателя с пусковой обмоткой

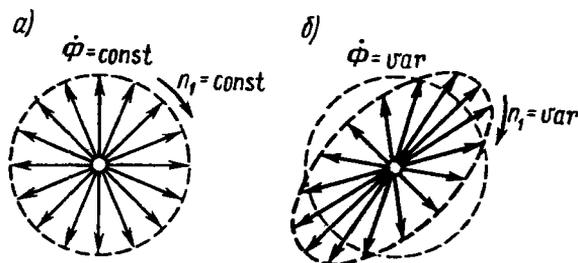


Рис. 4.5. Диаграммы кругового (а) и эллиптического (б) вращающихся магнитных полей

а токи \dot{I}_A и \dot{I}_B в обмотках должны быть сдвинуты по фазе относительно друг друга. Так как обе обмотки включены в однофазную сеть параллельно, то для получения фазового сдвига между токами \dot{I}_A и \dot{I}_B в цепь вспомогательной (пусковой) обмотки B включают фазосмещающий элемент ФЭ, в качестве которого используют активное сопротивление (резистор), индуктивность (дрессель) или емкость (конденсатор).

После того как ротор двигателя разгонится до частоты вращения, близкой к установившейся, пусковую обмотку B отключают. Таким образом, во время пуска двигатель работает как двухфазный, а по окончании пуска — как однофазный.

Для получения *кругового* вращающегося магнитного поля в двигателе с использованием двух обмоток на статоре, оси которых смещены в пространстве относительно друг друга на угол 90° эл. град, необходимо, чтобы МДС обмоток были равны ($F_A = F_B$), а токи в обмотках сдвинуты по фазе относительно друг друга на угол $\psi = 90^\circ$. Круговое поле характеризуется тем, что пространственный вектор $\vec{\Phi}$ магнитного потока этого поля вращается равномерно ($n_1 = \text{const}$) и его значение в любой момент времени постоянно $\Phi = \text{const}$ (рис. 4.5, а). Такое поле обеспечивает получение наибольшего пускового момента $M_{п}$, так как оно не содержит обратной составляющей.

При частичном нарушении какого-либо условия, например, $F_A \neq F_B$, или когда токи \dot{I}_A и \dot{I}_B сдвинуты по фазе на угол $\psi \neq 90^\circ$, обмотки статора создают вращающееся эллиптическое поле (рис. 4.5, б). Пространственный вектор магнитного потока этого поля вращается неравномерно ($n_1 = \text{var}$) и в разных пространственных положениях — неодинаковый ($\Phi = \text{var}$). Эллиптическое вращающееся поле состоит из двух не равных по величине вращающихся в разные стороны круговых полей: прямого (большого) и обратного (меньшего). Обратное вращающееся поле создает тормозной момент и ухудшает свойства однофазного двигателя.

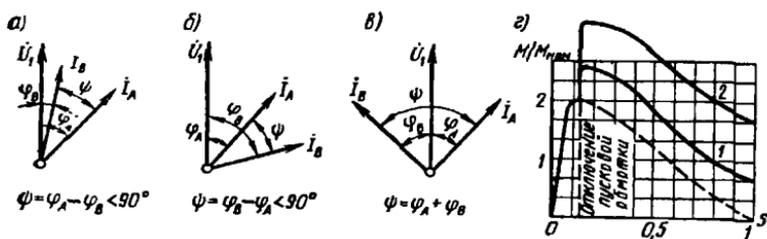


Рис. 4.6. Сравнение свойств фазосмещающих элементов

Если же, например, МДС $F_B = 0$ или токи \dot{I}_A и \dot{I}_B совпадают по фазе ($\psi = 0$), то магнитное поле статора становится пульсирующим, у которого прямая и обратная составляющие одинаковы.

В этих условиях двигатель не создает пускового момента.

Из векторных диаграмм, приведенных на рис. 4.6, а, б, видно, что включение в цепь обмотки B резистора с активным сопротивлением r или дросселя индуктивностью L не обеспечивает фазового сдвига между токами \dot{I}_A и \dot{I}_B в 90° . Лишь включение конденсатора емкостью C в качестве ФЭ обеспечивает фазовый сдвиг между токами \dot{I}_A и \dot{I}_B на угол $\psi = 90^\circ$ (рис. 4.6, в). При этом емкость конденсатора выбирают такой, чтобы ток \dot{I}_B в момент пуска двигателя ($s = 1$) опережал по фазе напряжение сети \dot{U}_1 на угол φ_B , дополняющий угол φ_A до 90° : $\psi = \varphi_A + \varphi_B = 90^\circ$.

Если при этом обе обмотки создают одинаковые МДС, то вращающееся поле статора будет круговым.

Таким образом, только использование конденсатора в качестве ФЭ обеспечивает однофазному асинхронному двигателю наилучшие пусковые свойства. Однако применение конденсаторов не всегда оправдано из-за их больших габаритных размеров.

Например, для однофазного асинхронного двигателя мощностью 40 Вт, включаемого в сеть напряжением 220 В, частотой 50 Гц, необходим пусковой конденсатор емкостью 20 мкф при рабочем напряжении 400 В. Габаритные размеры такого конденсатора довольно значительны, занимаемый им объем составляет примерно половину объема двигателя. Когда условия работы двигателя не требуют большого пускового момента, используются однофазные асинхронные двигатели с активным сопротивлением в качестве ФЭ. При этом не требуется включения дополнительного резистора, так как активное сопротивление пусковой обмотки повышается за счет выполнения ее из обмоточного провода уменьшенного поперечного сечения по сравнению с проводом рабочей обмотки. Пусковая обмотка такого двигателя включена лишь на время пуска, которое не превышает нескольких

секунд, поэтому уменьшенное сечение провода этой обмотки вполне допустимо. Пусковой момент таких двигателей не превышает номинального, но этого достаточно для большинства случаев применения однофазных асинхронных двигателей, включаемых в сеть при небольшой нагрузке на валу. Отечественной промышленностью изготавливается серия однофазных асинхронных двигателей с активным сопротивлением в качестве ФЭ серии АОЛБ мощностью от 18 до 270 Вт при синхронной частоте вращения 3000 и 1500 об/мин, предназначенных для включения в сеть напряжением 127, 220 или 380 В, частотой 50 Гц.

При использовании в качестве фазосмещающего элемента ФЭ конденсатора пусковой момент однофазного двигателя при правильно подобранной емкости C может составить $M_{п} = (1,6 \div 2,0)M_{ном}$. Механические характеристики однофазных асинхронных двигателей приведены на рис. 4.6, z : характеристика 1 — при использовании активного сопротивления в качестве ФЭ, характеристика 2 — при использовании для этого емкости (конденсатора), пунктирной линией изображена характеристика двигателя при отсутствии ФЭ в пусковой обмотке.

При одинаковых габаритных размерах мощность однофазного двигателя составляет приблизительно 40—45% от мощности трехфазного двигателя. Например, трехфазный асинхронный двигатель серии АОЛ типа АОЛ22-4 имеет номинальную мощность 400 Вт, а однофазный асинхронный двигатель с повышенным активным сопротивлением пусковой обмотки серии АОЛБ типа АОЛБ22-4, имеющий такие же габаритные размеры, что и трехфазный, обладает номинальной мощностью всего лишь 180 Вт.

■ 4.3. Конденсаторные асинхронные двигатели

Конденсаторный асинхронный двигатель — это двухфазный двигатель, на статоре которого расположены две обмотки фаз, занимающие одинаковое число пазов. Оси этих обмоток смещены в пространстве относительно друг друга на 90 эл. град. Питание двигателя осуществляется от однофазной сети, при этом обмотка фазы A включается в сеть непосредственно, а обмотка фазы B — через рабочий конденсатор $C_{раб}$ (рис. 4.7, a). В процессе работы конденсаторного двигателя обе обмотки включены постоянно. Таким образом, если однофазный асинхронный двигатель по окончании процесса пуска работает с пульсирующим магнитным полем, то конденсаторный двигатель — с вращающимся полем.

Для схемы включения конденсаторного асинхронного двигателя, показанной на рис. 4.7, a , при заданном напряжении сети U_1 емкость рабочего конденсатора, необходимая для получения кругового вращающегося поля, Φ ,

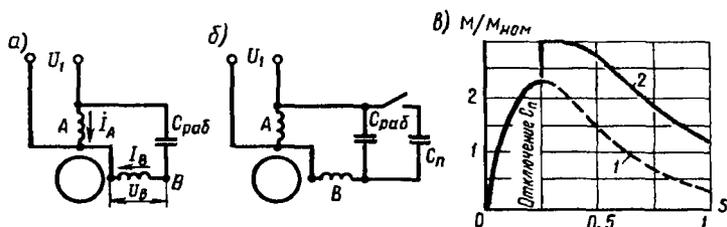


Рис. 4.7. Асинхронный конденсаторный двигатель
а — с рабочим конденсатором, *б* — с рабочим и пусковым конденсатором, *в* — механические характеристики 1 — при включенном рабочем конденсаторе, 2 — при включенных рабочем и пусковым конденсаторах

$$C_{\text{раб}} = I_A \cos \varphi_A / (U_1 f_1 k), \quad (4.8)$$

где φ_A — угол фазового сдвига между током \dot{I}_A и напряжением \dot{U}_1 при круговом вращающемся поле; k — коэффициент, определяемый отношением эффективных чисел витков в обмотках фаз статора *B* и *A*.

$$k = w_B k_{\text{об}B} / w_A k_{\text{об}A}, \quad (4.9)$$

$k_{\text{об}B}$ и $k_{\text{об}A}$ — обмоточные коэффициенты обмоток фаз статора *B* и *A*.

Емкость $C_{\text{раб}}$ (4.8) обеспечивает получение в двигателе кругового вращающегося поля только при коэффициенте $k = \text{tg } \varphi_A$. Анализ (4.8) показывает, что при заданном коэффициенте k круговое поле можно получить только для расчетного режима работы двигателя. При отклонении от этого режима меняются значения I_A и φ_A , вращающееся магнитное поле становится эллиптическим и рабочие свойства двигателя ухудшаются. Обычно конденсаторные асинхронные двигатели рассчитываются так, чтобы круговое вращающееся поле соответствовало номинальной или близкой к ней нагрузке. Из (4.8) следует, что емкость $C_{\text{раб}}$ обратно пропорциональна напряжению сети U_1 , т. е. чем выше напряжение сети, тем меньше требуемая емкость $C_{\text{раб}}$.

При выборе типа конденсатора $C_{\text{раб}}$ рабочее напряжение конденсатора определяется амплитудным значением синусоидального напряжения U_c , приложенного к конденсатору (рис. 4.7, *а*), при круговом вращающемся поле это напряжение превышает напряжение сети U_1 :

$$U_c = U_1 \sqrt{1 + k^2}. \quad (4.10)$$

Конденсаторные асинхронные двигатели имеют сравнительно высокий КПД и коэффициент мощности $\cos \varphi_1 = 0,80 \div 0,95$. Однако пусковые свойства этих двигателей неудовлетворительны, так как при пуске магнитное поле двигателя — эллиптическое и содержит значительную обратную составляющую. В итоге конденсаторный двигатель с рабочим конденсатором $C_{\text{раб}}$ создает пусковой момент

$M_n = (0,3 \div 0,5)M_{ном}$. Для повышения пускового момента параллельно рабочему конденсатору $C_{раб}$ включают пусковой конденсатор C_n (рис. 4.7, б). Емкость пускового конденсатора в несколько раз больше, чем рабочего. Например, для создания пускового момента, равного номинальному, требуется пусковой конденсатор емкостью $C_n = (2,0 \div 2,5)C_{раб}$. Для получения еще большего значения пускового момента пусковую емкость можно увеличить до $C_n = (5 \div 7)C_{раб}$.

На рис. 4.7, в показаны механические характеристики конденсаторного двигателя с рабочим конденсатором $C_{раб}$ (характеристика 1) и рабочим и пусковым конденсаторами ($C_{раб} + C_n$) (характеристика 2).

Пусковой конденсатор включается лишь на время пуска. После разгона двигателя C_n следует отключить, так как при небольших значениях скольжения в цепи обмотки В со значительной емкостью ($C_n + C_{раб}$) и индуктивностью L возможен резонанс напряжений или состояние, близкое к резонансу. В результате напряжения на конденсаторах и в обмотках статора могут превысить напряжение сети в 2—3 раза, вызвать пробой конденсаторов и выход из строя двигателя.

Конденсаторные двигатели с рабочим и пусковым конденсаторами применяют для приводов с тяжелыми условиями пуска. Применение пусковых конденсаторов удорожает установку и увеличивает ее габаритные размеры.

Промышленностью изготавливается большая номенклатура конденсаторных асинхронных двигателей, предназначенных для привода устройств автоматики и бытовой техники (холодильники, стиральные машины, электроинструмент и т. п.). В табл. 4.1 приведены технические данные некоторых типов асинхронных конденсаторных двигателей.

Таблица 4 1

Тип двигателя	Номинальные данные				Кратность пускового момента	Рабочая емкость, мкФ
	мощность, Вт	частота вращения, об/мин	КПД	cos φ ₁		
КД10-2/40Р	10	2710	0,25	0,80	0,65	1,0
КД60-2/45Р	60	2750	0,52	0,93	0,65	3,3
КД120-2ЭТ	120	2600	0,44	0,91	0,70	10,0
КД180-4/56Р	180	1370	0,55	0,83	0,55	8,0

Конденсаторные асинхронные двигатели, будучи двухфазными, могут работать и без конденсатора или другого фазосмещающего элемента. Но при этом к обмотке статора необходимо подвести напряжения \dot{U}_A и \dot{U}_B , сдвинутые по фазе относительно друг друга на 90°. Для получения таких напряжений можно использовать трехфазный источник питания с нулевым проводом (рис. 4,8, а), включив одну обмотку на линейное напряжения \dot{U}_{AB} , другую — на

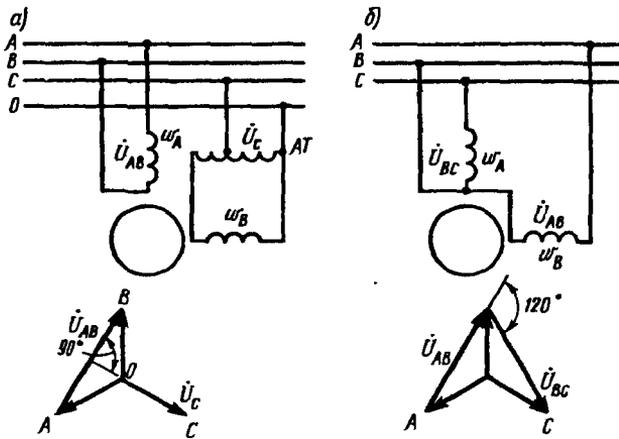


Рис. 4.8. Схемы включения двухфазного двигателя в трехфазную сеть

фазное \dot{U}_C через автотрансформатор AT (для выравнивания напряжений на фазных обмотках). Возможно также включение двигателя в трехфазную сеть без нулевого провода (рис. 4.8, б), но в этом случае напряжения на обмотках A и B будут сдвинуты по фазе на угол $\psi = 120^\circ$, что приведет к некоторому ухудшению пусковых и рабочих свойств двигателя. Однако схема включения двигателя намного упростится.

Для изменения направления вращения (реверсирования) ротора конденсаторного асинхронного двигателя необходимо поменять местами провода, соединяющие одну из обмоток статора (например, обмотку A) с источником питания. Переключение проводов сразу на двух обмотках статора не приведет к изменению направления вращения ротора.

4.4. Включение трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть

Трехфазные асинхронные двигатели малой мощности могут работать от однофазной сети. При этом двигатели могут быть использованы как однофазные с пусковым резистором r_n (рис. 4.9, а) или с пусковым конденсатором C_n (рис. 4.9, б, в) либо как конденсаторные с постоянно включенным рабочим конденсатором $C_{\text{раб}}$ и включаемым на время пуска пусковым конденсатором C_n (рис. 4.9, з, д, е).

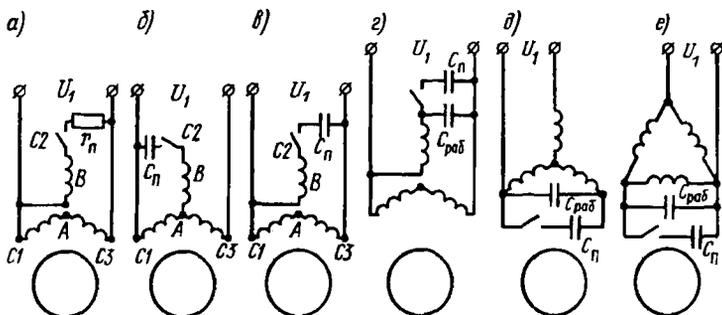


Рис. 4.9. Схемы включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть

Определим предварительно емкость, мкф, рабочего конденсатора при частоте тока 50 Гц по схемам рис. 4.9, з, д, е соответственно:

$$C_{\text{раб}} \approx 2700 I_{\text{ном}} / U_1, \quad (4.11)$$

$$C_{\text{раб}} \approx 2800 I_{\text{ном}} / U_1, \quad (4.12)$$

$$C_{\text{раб}} \approx 4800 I_{\text{ном}} / U_1, \quad (4.13)$$

где $I_{\text{ном}}$ — номинальный (фазный) ток статора трехфазного двигателя, А; U_1 — напряжение однофазной сети, В.

Окончательно значение $C_{\text{раб}}$ уточняется экспериментально, при этом токи в обмотках фаз двигателя при его работе с нагрузкой не должны превышать номинальное значение.

На рис. 4.10 приведены механические характеристики трехфазного асинхронного двигателя при его работе от трехфазной (1) и однофазной сети: с рабочим конденсатором (2), без ФЭ (3), с рабочим и пусковым конденсаторами (4).

При работе трехфазного асинхронного двигателя от однофазной сети без рабочего конденсатора, т. е. как однофазного, его номинальная мощность используется на 40—50%, а при работе с рабочим конденсатором — на 75—80%.

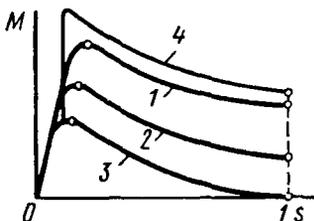


Рис. 4.10. Механические характеристики трехфазного асинхронного двигателя при различных схемах включения

В устройствах автоматики применяются универсальные асинхронные двигатели (УАД), которые могут работать как от трехфазной, так и от однофазной сети. В табл. 4.2 приведены технические данные некоторых асинхронных двигателей серий УАД с числом полюсов $2p = 4(n_1 = 1500 \text{ об/мин})$. В однофазную сеть эти двигатели включают по схеме рис. 4.9, д.

Тип двигателя	При включении в трехфазную сеть				При включении в однофазную				
	Номинальные данные			$M_{\Gamma}/M_{\text{ном}}$	Номинальные данные			$M_{\Gamma}/M_{\text{ном}}$	$C_{\text{рabo}} \text{ МКФ}$
	мощность, Вт	частота вращения об/мин	КПД		мощность, Вт	частота вращения об/мин	КПД		
УАД-24	1,2	1280	0,09	1,5	1,0	1280	0,09	0,5	0,5
УАД-34	2,5	1280	0,11	1,5	2,0	1280	0,11	0,5	1,0
УАД-44	6,0	1280	0,20	1,5	4,0	1300	0,14	0,5	2,0
УАД-54	9,0	1280	0,25	1,5	8,0	1300	0,24	0,5	2,0
УАД-64	20	1280	0,40	1,5	15	1300	0,35	0,3	3,0
УАД-74	30	1280	0,50	1,5	25	1300	0,45	0,2	4,0

4.5. Однофазные асинхронные двигатели с экранированными полюсами

Однофазные асинхронные двигатели с экранированными полюсами имеют на шихтованном сердечнике статора 1 явно выраженные полюса 3 с полюсными катушками 2 (рис. 4.11, а). Все катушки соединены последовательно и образуют обмотку возбуждения, включаемую в однофазную сеть. Каждый полюс разделен продольным па-

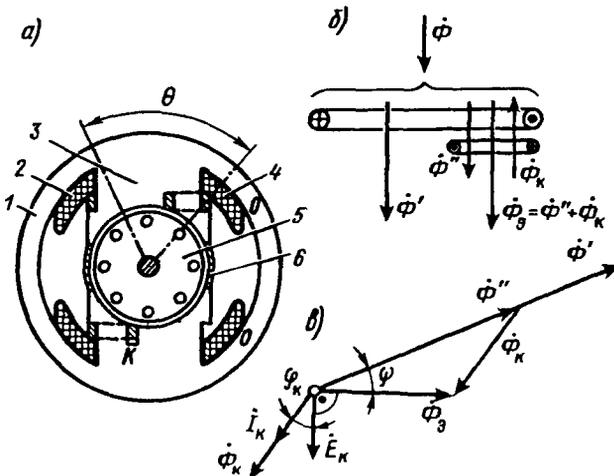


Рис. 4.11. Электромагнитная схема (а), распределение магнитных потоков (б) и векторная диаграмма (в) однофазного асинхронного двигателя с экранированными полюсами

зом на две неравные части таким образом, что оси, проведенные через середины указанных частей полюсов, располагаются под углом θ относительно друг друга. Одну из частей полюса (меньшую) охватывает короткозамкнутый медный виток 4 (экран). Ротор 5 двигателя обычный, короткозамкнутый.

При включении однофазной обмотки статора в сеть в магнитопроводе двигателя возникает пульсирующий магнитный поток Φ , большая часть которого $\dot{\Phi}'$ проходит через неэкранированную часть полюса, а меньшая $\dot{\Phi}''$ — через экранированную часть полюса (рис. 4.11, б). Поток $\dot{\Phi}''$ индуцирует, в короткозамкнутом витке ЭДС \dot{E}_k и в нем появляется ток \dot{I}_k , который за счет индуктивности витка отстает по фазе от \dot{E}_k на угол φ_k . Ток \dot{I}_k создает магнитный поток $\dot{\Phi}_k$, направленный встречно $\dot{\Phi}''$, создавая результирующий поток в экранированной части полюса $\dot{\Phi}_3 = \dot{\Phi}'' + \dot{\Phi}_k$. Вектор потока $\dot{\Phi}_3$ опережает по фазе ЭДС \dot{E}_k на 90° . В результате векторных построений (рис. 4.11, в) видим, что результирующий магнитный поток $\dot{\Phi}_3$ сдвинут во времени относительно магнитного потока $\dot{\Phi}'$ в неэкранированной части полюса на угол ψ .

Пространственный θ и временной ψ углы сдвига между потоками $\dot{\Phi}_3$ и $\dot{\Phi}'$ создают условия для возникновения в двигателе вращающегося эллиптического магнитного поля, поскольку $\dot{\Phi}_3 \neq \dot{\Phi}'$, $\theta < 90^\circ$ и $\psi < 90^\circ$. Поэтому пусковые и рабочие свойства рассматриваемого двигателя невысоки. Для их улучшения в конструкцию двигателя с экранированными полюсами вносят дополнения: под неэкранированной частью полюса увеличивают воздушный зазор, что несколько ослабляет поток $\dot{\Phi}'$ между полюсными наконечниками помещают магнитные шунты (стальные пластины) б, что увеличивает поток $\dot{\Phi}_3$. Эти меры способствуют сближению значений магнитных потоков $\dot{\Phi}_3$ и $\dot{\Phi}'$, а следовательно, несколько снижают эллиптичность вращающегося поля.

Однако кратность пускового момента таких двигателей не превышает 0,6; перегрузочная способность не более 1,4; КПД намного ниже, чем у конденсаторных двигателей такой же мощности, что объясняется значительными электрическими потерями в короткозамкнутом витке.

Двигатели с экранированными полюсами неререверсивны — ротор всегда вращается в направлении от неэкранированной части полюса к экранированной. Обычно эти двигатели изготавливают мощностью не более 100 Вт и применяют для привода устройств, не требующих большого пускового момента. Отечественная промышленность вы-

пускает асинхронные двигатели с экранированными полюсами серии АД...Е, предназначенные для привода приборов с вентиляторной нагрузкой. Двигатели рассчитаны на работу от сети переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц, их технические данные приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$ Вт	$n_{\text{ном}}$ об/мин	$I_{\text{ном}}$ А	КПД	$M_{\text{Г}}/M_{\text{ном}}$	Масса, кг
АД-2,5-4/40Е	2,5	1250	0,19	0,10	0,6	0,58
АД-4-4/40Е	4	1300	0,26	0,12	0,6	0,69
АД-6/4/40Е	6	1300	0,31	0,15	0,6	0,85
АД-10-4/45Е	10	1300	0,46	0,19	0,5	1,08
АД-16-4/45Е	16	1300	0,63	0,22	0,5	1,42
АД-25-4/45Е	25	1300	0,93	0,24	0,5	2,50

Контрольные вопросы

1. Почему в однофазном асинхронном двигателе не создается пусковой момент?
2. Каковы условия получения вращающегося магнитного поля в однофазном асинхронном двигателе?
3. Чем отличаются конденсаторный и однофазный двигатели?
4. Как увеличить пусковой момент конденсаторного двигателя?
5. Каково назначение короткозамкнутых витков в экранированном двигателе?

Глава 5

Синхронные двигатели

■ 5.1. Принцип действия и устройство синхронного явнополюсного двигателя с электромагнитным возбуждением

Характерный признак синхронного двигателя — вращение ротора с синхронной частотой $n_1 = f_1 60/p$ независимо от нагрузки на валу. Поэтому синхронные двигатели используют в системах автоматики для привода механизмов, требующих строго стабильной частоты вращения.

Синхронный двигатель, как и асинхронный, состоит из неподвижного статора и вращающегося ротора, разделенных воздушным зазором (у синхронных двигателей этот зазор несколько больше). Существуют конструктивные разновидности исполнения синхронных двигателей малой мощности, отличающиеся в основном устройством ротора: явнополюсные с электромагнитным возбуждением, явнополюсные с возбуждением постоянными магнитами, явнополюсные реактивные (с невозбужденным ротором), неявнополюсные гистерезисные.

Рассмотрим синхронные явнополюсные двигатели с *электромагнитным, возбуждением*.

Эти двигатели изготавливаются обычно мощностью в несколько киловатт и более и поэтому в устройствах автоматики широкого применения не получили. Однако основные положения теории этих двигателей используются при изучении синхронных двигателей малой мощности с возбуждением постоянными магнитами и других типов.

Для изучения принципа действия синхронного явнополюсного двигателя с электромагнитным возбуждением используем модель, представляющую собой две разделенные воздушным зазором магнитные системы с явно выраженными полюсами — внешнюю 1 и внутреннюю 2 (рис. 5.1). Если внешняя система полюсов неподвижна, то благодаря силам магнитного притяжения внутренняя система полюсов (ротор) расположится так, что ее полюсы будут находиться под полюсами внешней системы противоположной полярности. При этом силы F_m магнитного притяжения, действующие на внутреннюю систему, не будут создавать электромагнитного момента (рис. 5.2, а), так как они направлены радиально (по оси полюсов).

Если внешнюю систему полюсов вращать с небольшой частотой n_1 , то в начальный момент времени эта система сместится относительно внутренней на некоторый угол θ (рис. 5.2, б). При этом вектор

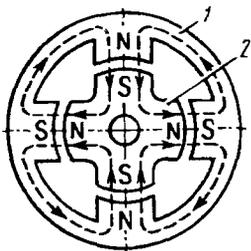


Рис. 5.1. Упрощенная модель синхронного двигателя

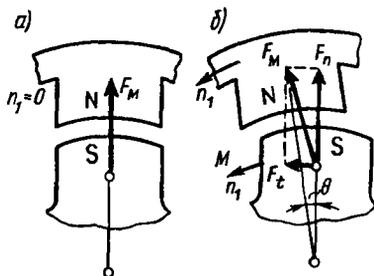


Рис. 5.2. Возникновение электромагнитного момента на роторе синхронного двигателя

силы магнитного притяжения F_M также повернется относительно оси полюса ротора. Теперь эта сила состоит из двух составляющих: $\vec{F}_M = F_n + F_t$, причем нормальная составляющая F_n направлена по оси полюса ротора, а тангенциальная F_t — перпендикулярно оси полюса. Совокупность составляющих F_t , действующих на все полюсы ротора, создает на роторе электромагнитный вращающий момент M , приводящий ротор во вращение с синхронной частотой n_1 , т. е. синхронно вращению внешней системы полюсов.

Трехфазный синхронный двигатель отличается от рассмотренной модели тем, что в нем вместо внешней системы полюсов имеется неявнополюсный статор с распределенной трехфазной обмоткой, аналогичный статору асинхронного трехфазного двигателя. Ротор синхронного двигателя — явнополюсной конструкции с электромагнитным возбуждением. При этом на полюсах ротора 2 располагают полюсные катушки 3 (рис. 5.3), которые при последовательном соединении образуют обмотку возбуждения (ОВ). При подключении ОВ к источнику постоянного тока возникает магнитный поток возбуждения Φ_b , силовые линии которого сцеплены с обмоткой статора 1. При включении обмотки статора в трехфазную сеть создается вращающееся с синхронной частотой n_1 магнитное поле с таким же числом полюсов, как на роторе. Благодаря взаимодействию полей статора и ротора возникает электромагнитный момент, вращающий ротор с

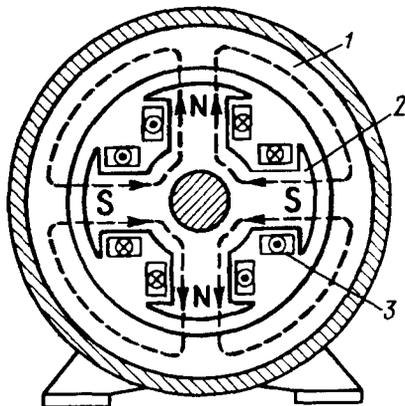


Рис. 5.3. Магнитная система явнополюсного синхронного двигателя ($2p = 4$)

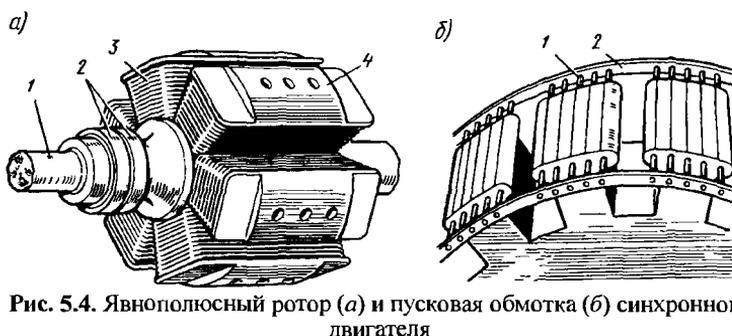


Рис. 5.4. Явнополюсный ротор (а) и пусковая обмотка (б) синхронного двигателя

синхронной частотой. В результате электрическая энергия сети преобразуется в механическую энергию вращения.

Предположим, что ротор двигателя вращается с частотой, отличающейся от частоты вращения поля статора, тогда в некоторые моменты времени возбужденные полюса ротора окажутся под одноименными полюсами поля статора, возникнут силы магнитного отталкивания. Суммарный электромагнитный момент станет равным нулю и ротор остановится.

На рис. 5.4, а показана конструкция ротора синхронного двигателя с явно выраженными полюсами. Ротор состоит из вала 1, на котором укреплены сердечники полюсов с полюсными катушками 3. Каждый сердечник заканчивается полюсным наконечником 4. В полюсных наконечниках имеются пазы (рис. 5.4, б), в которых расположены стержни 1 пусковой обмотки, замкнутые с двух сторон кольцами 2. Для подключения вращающейся обмотки возбуждения к источнику постоянного тока на валу ротора находятся два изолированных от вала и друг от друга контактных кольца 2 (рис. 5.4, а), по которым скользят щетки, вставленные в специальные щеткодержатели. От щеток сделаны вы-

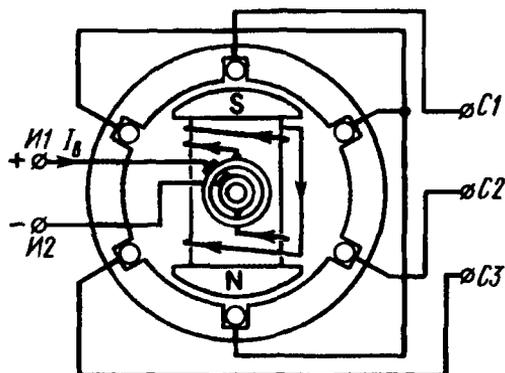


Рис. 5.5. Электромагнитная схема синхронного двигателя

воды $I1$ и $I2$, через которые обмотка возбуждения соединяется с источником постоянного тока (рис. 5.5) и в цепи обмотки протекает ток возбуждения I_v , который создает МДС $F_v = I_v w_v$. В магнитопроводе двигателя появляется поток возбуждения Φ_v . В качестве источника постоянного тока в синхронных двигателях обычно используют полупроводниковые выпрямительные устройства. Например, в двигателях средней и большой мощности применяют тиристорные возбудительные устройства серии ТВУ. Подключение двигателя к трехфазной сети осуществляется через выводы обмотки статора $C1, C2, C3$.

■ 5.2. Пуск синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением

Синхронный двигатель при подключении его обмоток к источнику питания не развивает пускового момента. Ротор по причине своей инерционности не может мгновенно достичь частоты вращения, равной частоте вращения магнитного поля статора, которая устанавливается почти одновременно с включением обмотки статора в сеть. Поэтому между полюсами возбужденного ротора и вращающегося поля статора не возникает устойчивой магнитной связи, создающей синхронный вращающий момент.

Для пуска синхронного двигателя необходимо предварительно привести ротор во вращение с частотой, близкой частоте вращения поля статора. При этом поле статора настолько медленно перемещается относительно полюсов ротора, что при подключении обмотки возбуждения к источнику питания между полюсами ротора и вращающегося поля статора устанавливается магнитная связь, обеспечивающая возникновение синхронного электромагнитного момента. Под действием этого момента ротор втягивается в синхронизм, т. е. начинает вращаться с синхронной частотой.

Существует несколько способов пуска синхронного двигателя, но практическое применение получил *асинхронный* способ. Для его реализации в пазах полюсных наконечников ротора располагают стержни пусковой короткозамкнутой обмотки, выполненной аналогично обмотке короткозамкнутого ротора (см. рис. 3.2). Обычно стержни этой обмотки делают из латуни или меди и замыкают с двух сторон медными кольцами (см. рис. 5.4, б).

Для пуска синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением замыкают обмотку возбуждения OB на резистор r (рис. 5.6, а), подключают к трехфазной сети обмотку статора. Вращающееся поле статора наводит в пусковой обмотке ЭДС, которая создает в стержнях обмотки ток. В результате взаимодействия этих токов с вращающимся полем статора на каждый стержень ротора действует электромагнитная сила $F_{эм}$ (рис. 5.6, б). Совокупность таких сил создает асин-

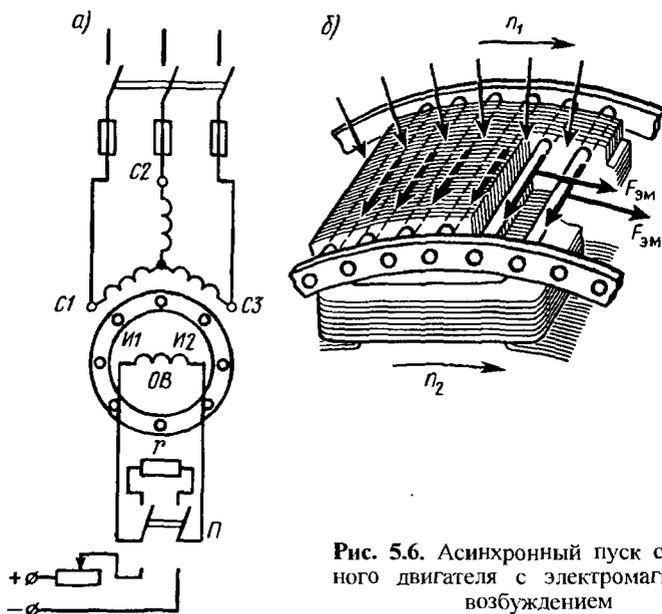


Рис. 5.6. Асинхронный пуск синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением

хронный электромагнитный момент M_a , под действием которого ротор начинает вращаться в ту же сторону, что и поле статора. После разгона ротора до частоты вращения, близкой к синхронной ($n_2 \approx 0,95n_1$), обмотку возбуждения OB подключают к источнику постоянного тока. При этом двигатель возбуждается (полюса ротора намагничиваются), между вращающимся полем статора и полюсами ротора устанавливается устойчивая магнитная связь, создающая синхронный электромагнитный момент M , и двигатель втягивается в синхронизм, т. е. его ротор начинает вращаться синхронно с вращающимся магнитным полем. В пусковой обмотке ротора больше не наводится ЭДС, асинхронный момент $M_a = 0$. Пусковая короткозамкнутая обмотка в режиме синхронного вращения ротора выполняет роль демпферной (успокоительной) обмотки, ограничивая возможные колебания (качания) ротора, вызванные изменениями нагрузки на валу двигателя. Переход ротора от частоты вращения $n_2 < n_1$ к синхронной происходит скачком.

С ростом нагрузки на валу двигателя вхождение в синхронизм затрудняется. При нагрузке, превышающей допустимую, вхождения в синхронизм не происходит. Максимальный момент нагрузки на валу синхронного двигателя, при котором ротор еще втягивается в синхронизм, называется *моментом входа в синхронизм* $M_{вх}$.

Не допускается пуск синхронного двигателя с подключенной к источнику постоянного тока обмоткой возбуждения, так как в этом

случае магнитный поток возбуждения Φ_v при разгоне ротора будет наводить в обмотке статора ЭДС. В результате взаимодействия проходящего на обмотке статора тока, вызванного этой ЭДС, с полем возбуждения возникает тормозящий момент, ухудшающий пусковые свойства синхронного двигателя.

При пуске синхронного двигателя обмотку возбуждения следует замкнуть на резистор с активным сопротивлением r , примерно в 10 раз превышающим активное сопротивление обмотки возбуждения. Если оставить обмотку возбуждения разомкнутой, то вращающееся поле статора, обгоняя ротор с большой скоростью, наведет в его обмотке значительную ЭДС, способную вызвать пробой межвитковой изоляции обмотки возбуждения.

Пусковые параметры синхронного двигателя — асинхронный пусковой момент и кратность пускового тока — в значительной степени зависят от активного сопротивления пусковой обмотки r_2 ротора (см. § 3.5).

■ 5.3. Потери, КПД и электромагнитный момент синхронного двигателя

В синхронном двигателе, как и в любой электрической машине, преобразование электрической энергии в механическую сопровождается потерями.

Потери и КПД. Потери разделяются на основные и добавочные. Основные потери синхронного двигателя складываются из магнитных и электрических потерь в статоре, потерь на возбуждение и механических. Магнитные потери в сердечнике статора $P_{м1}$, электрические потери в обмотке статора $P_{э1}$, добавочные потери $P_{доб}$ и КПД определяют, так же как и для асинхронных двигателей (см. § 3.4), по (3.16), (3.21) и (3.24).

Потери на возбуждение, Вт,

$$P_v = I_v^2 r_v + \Delta U_{щ} I_v, \quad (5.1)$$

где r_v — активное сопротивление обмотки возбуждения, приведенное к рабочей температуре, Ом; $\Delta U_{щ} = 2V$ — падение напряжения в щетках цепи возбуждения.

Механические потери $P_{мех}$ состоят из потерь на трение в подшипниках и контактных кольцах и потерь на вентиляцию.

Суммарные потери в синхронном двигателе, Вт,

$$\Sigma P = P_{м1} + P_{э1} + P_v + P_{мех} + P_{доб}. \quad (5.2)$$

Коэффициент полезного действия синхронного двигателя зависит от нагрузки на валу P_2 и коэффициента мощности $\cos \varphi_1$. Для син-

хронных двигателей мощностью до 100 кВт КПД при номинальной нагрузке составляет 80—90%.

Электромагнитный момент. Электромагнитная мощность синхронного двигателя, Вт,

$$P_{эм} = P_1 - (P_{э1} + P_{м1}) \quad (5.3)$$

затрачивается в основном на создание электромагнитного момента, Н · м,

$$M = P_{эм} / \omega_1. \quad (5.4)$$

Электромагнитный момент синхронного явнополюсного двигателя с электромагнитным возбуждением, Н · м,

$$M \approx \frac{m_1 E_0 U_1}{(\omega_1 x_d)} \sin \theta + \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta, \quad (5.5)$$

где E_0 — ЭДС, наведенная в обмотке фазы статора магнитным потоком обмотки возбуждения Φ_b , В; x_d и x_q — индуктивные сопротивления обмотки статора соответственно по продольной и поперечной осям, Ом.

Неравенство индуктивных сопротивлений $x_d > x_q$, обусловлено неравномерностью воздушного зазора явнополюсного синхронного двигателя: по продольной оси dd (по оси полюсов ротора) воздушный зазор намного меньше зазора по поперечной оси qq (по оси, проходящей через середину межполюсного пространства). Поэтому магнитные сопротивления вращающемуся магнитному потоку статора Φ_1 по указанным осям также неодинаковы: магнитное сопротивление по продольной оси dd меньше магнитного сопротивления по поперечной оси qq (рис. 5.7).

Анализ (5.5) показывает, что электромагнитный момент синхронного двигателя с явнополюсным ротором и электромагнитным возбуждением представляет собой сумму двух составляющих:

основного момента

$$M_{осн} \approx \frac{m_1 E_0 U_1 \sin \theta}{\omega_1 x_d}, \quad (5.6)$$

реактивного момента

$$M_p \approx \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (5.7)$$

Основной момент $M_{осн}$ прямо пропорционален ЭДС обмотки статора E_0 , а следовательно и магнитному потоку Φ_b (так как $E_0 \equiv \Phi_b$) и напряжению питания U_1 . Реактивный момент не зависит от потока

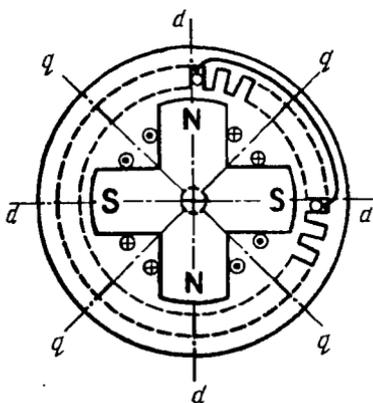


Рис. 5.7. Магнитная система явнополюсного синхронного двигателя

возбуждения $\Phi_{\text{в}}$, но прямо пропорционален квадрату напряжения питания U_1 . Следовательно, реактивный момент действует на ротор явнополюсного двигателя даже при отключенном возбуждении ($I_{\text{в}} = 0$). Таким образом, электромагнитный момент явнополюсного синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением равен

$$M = M_{\text{осн}} + M_{\text{р}}. \quad (5.8)$$

Возникновение реактивного момента обусловлено разностью магнитных сопротивлений магнитопровода явнополюсной синхронной машины по продольной и поперечной осям (рис. 5.7).

Даже при отсутствии возбуждения в синхронном явнополюсном двигателе магнитное поле статора за счет магнитного притяжения явно выраженных полюсов ротора создает силу $F_{\text{р}}$. С появлением на роторе нагрузочного момента между осями поля статора и полюса ротора появляется угол θ . При этом возникает тангенциальная составляющая $F_{\text{тр}}$ силы $F_{\text{р}}$, которая стремится повернуть ротор в положение, при котором вращающийся магнитный поток статора испытывает минимальное магнитное сопротивление (рис. 5.8). Совокупность сил $F_{\text{тр}}$, действующих на каждый полюс ротора, создает реактивный момент $M_{\text{р}}$, направленный в сторону вращения поля статора.

Если ротор двигателя неявнополюсный (например, как в асинхронном двигателе), то магнитные сопротивления по всем осям ротора одинаковы, следовательно, и реактивный момент не возникает.

Из (5.6) и (5.7) следует, что основной и реактивный моменты синхронного явнополюсного двигателя зависят от угла θ (рис 5.9). Зависимость основного момента $M_{\text{осн}} = f(\theta)$ представляет собой синусоиду с максимальным значением момента при $\theta = 90^\circ$, а зависимость реактивного момента $M_{\text{р}} = f(\theta)$ — синусоиду с двумя максимальными значениями: положительным при $\theta = 45^\circ$ и отрицательным при $\theta = 135^\circ$. Зависимость результирующего момента $M = f(\theta)$, полученная путем сложения ординат графиков составляющих моментов

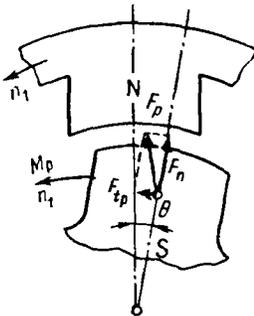


Рис. 5.8. Возникновение реактивного момента

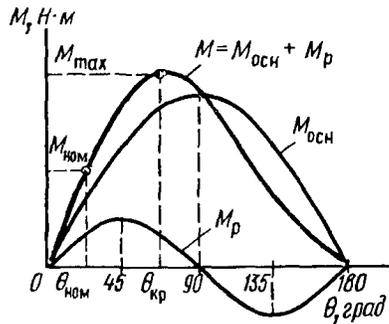


Рис. 5.9. Угловые характеристики синхронного двигателя

$M_{\text{осн}}$ и $M_{\text{р}}$, называется *угловой характеристикой* синхронного явнополюсного двигателя.

С увеличением нагрузочного момента на валу двигателя растет угол θ . При этом момент M сначала увеличивается и при $\theta = \theta_{\text{кр}}$ достигает максимального значения M_{max} . Дальнейший рост нагрузки, а следовательно, рост угла θ сопровождается уменьшением электромагнитного момента M . При этом неуравновешенная часть нагрузочного момента вызывает снижение частоты вращения ротора, что ведет к «выпадению» синхронного двигателя из синхронизма. В итоге двигатель либо остановится, либо его ротор будет продолжать вращение под действием асинхронного момента $M_{\text{а}}$. Максимальный синхронный момент M_{max} называют *моментом выхода двигателя из синхронизма*, а отношение этого момента к номинальному $M_{\text{ном}}$ называют *перегрузочной способностью* синхронного двигателя $\lambda = M_{\text{max}} / M_{\text{ном}}$. Обычно перегрузочная способность синхронных явнополюсных двигателей с электромагнитным возбуждением $\lambda = 2 \div 3$.

■ 5.4. Синхронные двигатели с постоянными магнитами

Синхронные двигатели с постоянными магнитами не имеют обмотки возбуждения, что упрощает их конструкцию, делает ее более надежной из-за отсутствия контактных колец и щеток. Требуемый для возбуждения магнитный поток в этих двигателях создается постоянными магнитами, расположенными на роторе. При этом статор двигателя выполнен так же, как у синхронных двигателей с электромагнитным возбуждением.

Синхронные двигатели малой мощности, возбуждаемые постоянными магнитами, изготавливают в двух конструктивных исполнениях: с радиальным и аксиальным расположением постоянных магнитов.

При радиальном расположении постоянных магнитов шихтованный пакет ротора с пусковой клеткой, выполненный в виде полого цилиндра, закрепляют на наружной поверхности явно выраженных полюсов постоянного магнита. С внутренней стороны этого цилиндра делают межполюсные прорезы, предотвращающие замыкание магнитного потока постоянного магнита в этом цилиндре (рис 5.10, а). Обычно прорезы делают несквозными, оставляя между полюсами небольшие перемычки, называемые мостиками насыщения. Такая конструкция повышает механическую прочность ротора и улучшает пусковые свойства двигателя.

При аксиальном расположении магнитов ротор имеет конструкцию, аналогичную ротору асинхронного короткозамкнутого двигателя. К торцу ротора прижат кольцевой постоянный магнит. В не-

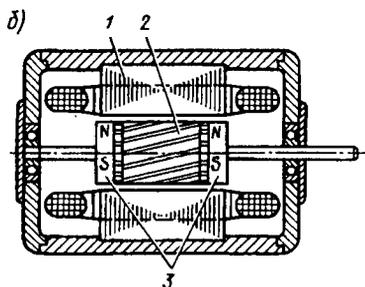
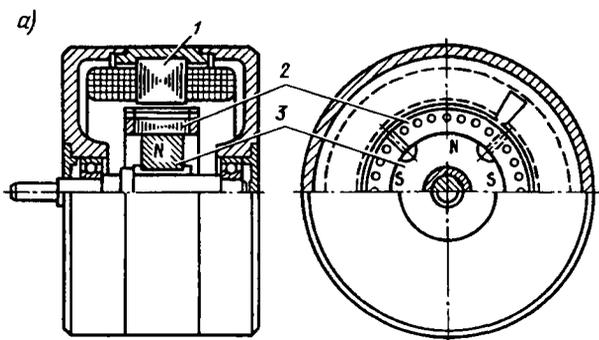


Рис. 5.10. Синхронные двигатели, возбуждаемые постоянными магнитами с радиальным (а) и аксиальным (б) расположением магнитов:
 1 — статор, 2 — короткозамкнутая обмотка, 3 — постоянный магнит

которых конструкциях применяют два постоянных магнита 3, расположенных по обе стороны короткозамкнутого ротора 2 (рис. 5.10, б). Двигатели с аксиальным расположением магнитов применяют при небольших диаметрах статора 1 и мощности не более 100 Вт. В двигателях с большим диаметром статора и мощностью 500 Вт и более применяют конструкцию с радиальным расположением постоянных магнитов.

Пуск синхронных двигателей с постоянными магнитами имеет особенность, обусловленную включением этих двигателей в сеть при возбужденном роторе. В этом случае при разгоне на ротор двигателя помимо асинхронного момента M_a и момента сопротивления нагрузки $M_{нагр}$ действует еще и тормозной (по отношению к моменту M_a) момент M_T , возникающий от взаимодействия магнитного поля ротора (поля постоянных магнитов) с токами, наведенными в обмотке статора этим полем (токи замыкаются через источник питания обмотки статора). Эти токи прямо пропорциональны частоте вращения ротора $n_2 = n_1(1 - s)$, поэтому если максимальное значение асинхронного вращающего момента M_a соответствует небольшому скольжению s (см. § 3.4), то максимум тормозного момента M_T соответствует небольшой величине $(1 - s)$, т. е. большому значению скольжения s . Тормозной момент M_T направлен встречно вращающему асинхронно-

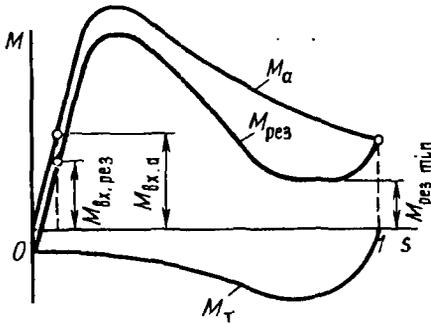


Рис. 5.11. Графики электромагнитных моментов при пуске синхронного двигателя с постоянными магнитами

му моменту M_a и ухудшает пусковые свойства синхронных двигателей с постоянными магнитами.

На рис. 5.11 показаны графики зависимости асинхронного M_a и тормозного M_T моментов от скольжения s . График результирующего момента $M_{рез} = f(s)$ получен сложением $M_{рез} = M_a + M_T$ и имеет провал в зоне скольжения, близких к единице, т. е. при малых частотах вращения ротора. Тормозной момент M_T

ослабляет результирующий момент входа в синхронизм $M_{вх. рез}$, который оказывается меньше момента входа в синхронизм $M_{вх. а}$, соответствующего пуску двигателя при невозбужденном роторе.

Для обеспечения надежного пуска рассматриваемых двигателей необходимо, чтобы минимальный результирующий момент $M_{рез min}$ в асинхронном режиме и момент входа в синхронизм $M_{вх. рез}$ были больше момента нагрузки $M_{нагр}$. Форма графика результирующего момента при пуске синхронного двигателя с постоянными магнитами зависит от активного сопротивления обмотки статора r_1 и от степени возбужденности двигателя, которая характеризуется $\epsilon_n = (E_0/U_1) < 1$, где E_0 — ЭДС фазы статора, наведенная потоком возбуждения в режиме холостого хода при вращении ротора с синхронной частотой. При увеличении r_1 и ϵ_n тормозной момент возрастает. поэтому в рассматриваемых двигателях со сравнительно большим активным сопротивлением обмотки статора r_1 степень возбужденности ϵ_n должна быть небольшой. При слишком большом значении ϵ_n двигатель может не запуститься при включении в сеть.

Электромагнитные процессы, сопровождающие работу синхронных двигателей с постоянными магнитами, аналогичны процессам, протекающим при работе синхронных двигателей с электромагнитным возбуждением. Постоянные магниты в рассматриваемых двигателях подвержены размагничиванию действием вращающегося поля статора. Наибольшее размагничивающее действие этого поля имеет место при пуске двигателя, когда ротор, вращаясь асинхронно, периодически проходит положения, при которых МДС обмотки статора направлена встречно МДС постоянных магнитов ротора. Пусковая короткозамкнутая обмотка ротора несколько ослабляет размагничивание постоянных магнитов, оказывая экранизирующее действие.

Достоинства синхронных двигателей с постоянными магнитами: равномерность частоты вращения, возможность синхронного враще-

ния нескольких двигателей, включенных в одну сеть, сравнительно высокие энергетические показатели (КПД и $\cos \varphi_1$).

Недостаток синхронных двигателей с постоянными магнитами — повышенная стоимость по сравнению с синхронными двигателями других типов, обусловленная высокой стоимостью постоянных магнитов, сложностью их обработки.

Синхронные двигатели с постоянными магнитами изготавливают трехфазными или двухфазными (конденсаторными) на небольшие мощности и применяют в устройствах автоматики для привода механизмов, требующих постоянной частоты вращения.

В табл. 5.1 приведены технические данные синхронных двигателей с постоянными магнитами некоторых типоразмеров серии ДС, предназначенных для включения в сеть частотой 50 Гц.

Таблица 5.1

Тип двигателя	Номинальные данные			Напряжение сети, В	Примечание
	Мощность, Вт		Частота вращения, об/мин		
	полезная	потребляемая			
ДС-22-1500/750	16/10	48	1500/750	380	Трехфазный двухскоростной Конденсаторный →—
ДС 10-1500М	10	28	1500	220	
ДС-12-3000	0,25	2,5	3000	127	

5.5. Синхронные реактивные двигатели

Синхронный реактивный двигатель (СРД) представляет собой явнополюсный синхронный двигатель с невозбужденными полюсами ротора. Магнитное поле в таком двигателе создается только одной МДС обмотки статора. В этом отношении СРД аналогичен асинхронному двигателю и отличается от него лишь тем, что сердечник его ротора имеет явно выраженные полюса.

Для выяснения принципа действия СРД обратимся к выражению электромагнитного момента синхронного явнополюсного двигателя [см. (5.6)], из которого следует, что если в двигателе с электромагнитным возбуждением отключить обмотку возбуждения, то ЭДС $E_0 = 0$. Основная составляющая электромагнитного момента $M_{осн}$ становится равной нулю, и такой двигатель развивает лишь реактивный момент [см. (5.7)].

При подключении обмотки статора к сети возникает вращающееся магнитное поле. Когда ось этого поля $d' - d'$ займет положение в пространстве рашочки статора, при котором она будет смещена относитель-

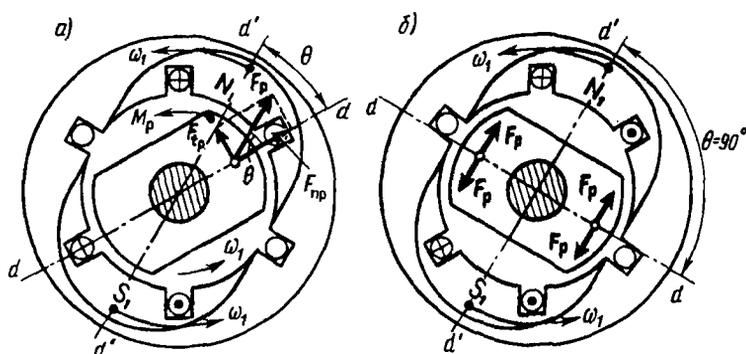


Рис. 5.12. Принцип действия синхронного реактивного двигателя

но продольной оси невозбужденных полюсов ротора $d-d$ на угол θ в сторону вращения (рис. 5.12, а), между полюсами поля и невозбужденного ротора возникает сила F_p магнитного притяжения полюса ротора к полюсу вращающегося поля статора. Вектор этой силы смещен относительно продольной оси ротора также на угол θ , поэтому F_p имеет две составляющие: нормальную F_{np} , направленную по продольной оси полюсов ротора, и тангенциальную F_{tp} , направленную перпендикулярно продольной оси полюсов ротора. Совокупность тангенциальных составляющих F_{tp} на всех полюсах невозбужденного ротора создаст вращающий реактивный момент M_p , который приводит ротор во вращение с синхронной частотой ω_1 . С ростом механической нагрузки на валу СРД угол θ увеличивается, момент M_p растет.

Однако при значении угла $\theta = 90^\circ$ реактивный момент $M_p = 0$ (см. рис. 5.9). Такая зависимость момента M_p от угла θ является принципиальной для реактивного момента, отличающая его от основной составляющей электромагнитного момента $M_{осн}$ синхронного двигателя с возбужденными полюсами, которая при $\theta = 90^\circ$ достигает максимального значения.

Из рис. 5.12, б видно, что при $\theta = 90^\circ$ реактивные силы магнитного притяжения F_p , действующие на каждый полюс невозбужденного ротора, взаимно уравновешиваются и реактивный момент $M_p = 0$. Максимальное значение реактивного момента M_{pmax} наступает при $\theta = 45^\circ$. Зависимость реактивного момента от угла θ (см. рис. 5.9):

$$M_p = M_{pmax} \sin 2\theta. \quad (5.9)$$

Необходимое условие возникновения реактивного момента — явнорольная конструкция ротора, так как в этом случае $x_d \neq x_q$.

Мощность и развиваемый момент СРД меньше, чем у синхронного двигателя с возбужденными полюсами ротора. Это объясняется

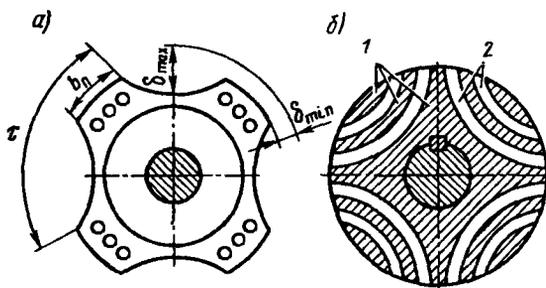


Рис. 5.13. Конструкция ротора СРД

тем, что у СРД из-за отсутствия магнитного потока ротора ЭДС $E_0 = 0$ и поэтому основная составляющая электромагнитного момента $M_{очн} = 0$ [см. (5.6)]. Поэтому при одинаковых габаритных размерах синхронного двигателя с возбужденными полюсами ротора и СРД мощность на валу и развиваемый момент у СРД намного меньше.

Недостатки СРД — невысокие значения коэффициента мощности и КПД. Это объясняется большим значением намагничивающего тока статора, так как возбуждение СРД происходит только за счет магнитного поля статора.

Ротор СРД выполняется с короткозамкнутой обмоткой, что обеспечивает возможность асинхронного пуска двигателя. На рис. 5.13, а показана традиционная конструкция ротора СРД, который отличается от ротора асинхронного двигателя наличием межполюсных впадин, обеспечивающих ротору явнополюсную конструкцию. Чем больше эти впадины, тем больше реактивный момент M_p . Однако с увеличением межполюсных впадин растет среднее значение воздушного зазора, что ведет к увеличению намагничивающего тока статора, а следовательно, к снижению энергетических показателей двигателя — коэффициента мощности, и КПД. С увеличением межполюсных впадин сокращаются размеры пусковой обмотки на роторе, что уменьшает пусковой асинхронный момент, т. е. уменьшает момент входа в синхронизм.

Наилучшие результаты дает следующее соотношение размеров ротора:

$$b_n/\tau = 0,5 \div 0,6 \text{ и } \delta_{\max}/\delta_{\min} = 10 \div 12,$$

где τ — полюсное деление; b_n — ширина полюса ротора.

При этом удается получить $x_d/x_q \approx 2$.

Более совершенна секционированная конструкция ротора СРД, представляющая собой цилиндр, в котором стальные полосы 2 залиты алюминием 1 (рис. 5.13, б). Такая конструкция позволяет получить отношение сопротивлений $x_d/x_q = 4 \div 5$. За счет этого значительно

возрастает максимальное значение реактивного момента $M_{р\max}$ при сохранении намагничивающего тока на допустимом уровне. На торцах секционированного ротора имеются отлитые из алюминия кольца, замыкающие алюминиевые прослойки ротора, образуя короткозамкнутую пусковую обмотку.

Простота конструкции и высокая эксплуатационная надежность обеспечили СРД малой мощности широкое применение в устройствах автоматики для привода самопишущих приборов, в устройствах звуко- и видеозаписи и других установках, требующих строгого постоянства частоты вращения.

Промышленностью изготавливаются СРД мощностью от долей до нескольких десятков ватт. Например, конденсаторный СРД типа СД-10 номинальной мощностью 10 Вт имеет следующие параметры: частота вращения 3000 об/мин; КПД $\eta_{\text{ном}} = 0,28$; $\cos \varphi_1 = 0,77$; кратность пускового момента $M_{п}/M_{\text{ном}} = 1$; перегрузочная способность $M_{р\max}/M_{\text{ном}} = 2$; емкость $C_{\text{раб}} = 1$ или 3 мкф, номинальное напряжение 220 или 127 В частотой 50 Гц. Для привода лентопротяжных механизмов в автоматических мостах, потенциометрах и других приборных устройствах широко используется конденсаторный СРД типа СД-54 со встроенным редуктором. Этот двигатель предназначен для включения в сеть частотой 50 Гц, частота вращения ротора 1500 об/мин. Обмотка статора двухфазная, состоит из двух одинаковых обмоток фаз. При этом обмотки фаз состоят из полюсных катушек, каждая катушка располагается на отдельном зубце, а сердечник статора составлен из этих зубцов. Такая конструкция сердечника статора и его обмотки обеспечивает простоту изготовления, что важно при массовом изготовлении двигателей. Редуктор двигателя имеет 9 вариантов комплектации цилиндрическими зубчатыми колесами, это обеспечивает

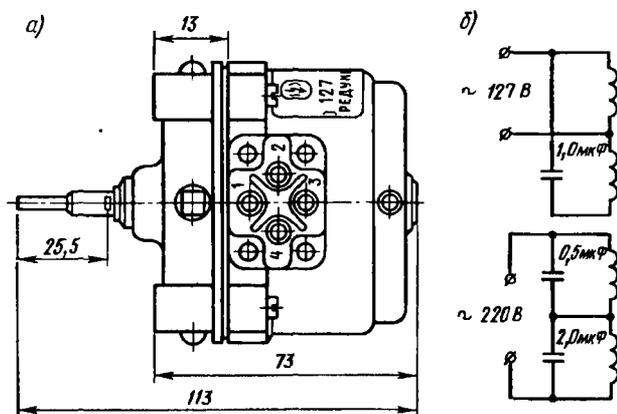


Рис. 5.14. Внешний вид и схемы включения двигателя СД-54

получение следующих частот вращения выходного вала двигателя, об/мин (при $n_1 = 1500$ об/мин): 96,0, 60,0, 38,4, 24,0; 19,59; 10,94, 5,6; 3,14; 2,24.

На рис. 5.14 показан внешний вид и схемы включения в сеть реактивного синхронного двигателя СД-54.

5.6. Синхронные гистерезисные двигатели

Конструктивная особенность синхронного гистерезисного двигателя — наличие цилиндрического (неявнополюсного) ротора.

Принцип работы синхронного гистерезисного двигателя основан на действии *гистерезисного момента*. На рис. 5.15, а показана упрощенная модель этого двигателя, состоящая из постоянного магнита, между полюсами которого расположен цилиндр (ротор) из магнитотвердого материала. Под действием внешнего магнитного поля ротор намагничивается. При этом на стороне ротора, обращенной к северному полюсу постоянного магнита, возбуждается южный магнитный полюс, а на стороне, обращенной к южному полюсу постоянного магнита, — северный магнитный полюс. В результате на ротор двигателя действуют силы магнитного притяжения F_M , направленные радиально к его поверхности. Если же полюсы постоянного магнита вращать вокруг ротора, т. е. создать вращающееся магнитное поле, то вследствие магнитного запаздывания (явление гистерезиса) активная часть ротора не будет перемагничиваться одновременно с изменением направления внешнего вращающегося магнитного поля: между осью поля ротора и осью внешнего поля появится угол сдвига γ . Силы F_M , действующие на ротор, изменят свое направление на угол γ , а танген-

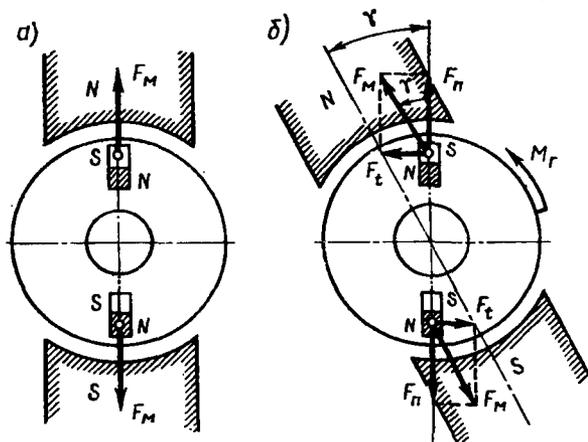


Рис. 5.15. К понятию о гистерезисном моменте

циальные составляющие этих сил F_i создадут гистерезисный момент M_r (рис. 5.15, б).

Явление магнитного запаздывания заключается в том, что частицы ферромагнитного материала ротора, представляющие собой элементарные магниты, стремятся ориентироваться в соответствии с направлением внешнего магнитного поля. Если внешнее магнитное поле изменит свое направление, то элементарные частицы также меняют ориентацию. Однако повороту элементарных частиц в магнитотвердом материале препятствуют силы молекулярного трения. Этим и объясняется появление угла γ , значение которого зависит от магнитных свойств материала ротора.

На преодоление сил молекулярного трения расходуется часть подводимой мощности, которая составляет потери на явление гистерезиса, значение потерь зависит от частоты перемагничивания ротора $f_2 = f_1 s$, а следовательно, от скольжения s :

$$P_r = s P_{r,к} \quad (5.10)$$

где $P_{r,к}$ — потери на перемагничивание при неподвижном роторе, т. е. при $s = 1$.

Электромагнитная мощность, передаваемая ротору [см. (3.18)],

$$P_{эм} = P_1 / s = P_{r,к} \quad (5.11)$$

а гистерезисный момент

$$M_r = P_{эм} / \omega_1 = P_{r,к} / \omega_1, \quad (5.12)$$

следовательно, гистерезисный момент не зависит от частоты вращения ротора (скольжения). График $M_r = f(s)$ представляет собой прямую, параллельную оси абсцисс (рис. 5.16).

Угол γ сдвига зависит от ширины петли гистерезиса — чем шире такая петля гистерезиса ферромагнитного материала, тем больше угол сдвига γ , а следовательно, тем больше величина гистерезисного момента. Современные магнитотвердые материалы допускают получение угла $\gamma = 30 \div 60^\circ$. На рис. 5.17, а показаны петли гистерезиса обычной стали 2 и сплава викаллой 1.

При изготовлении ротора обычная электротехническая сталь не

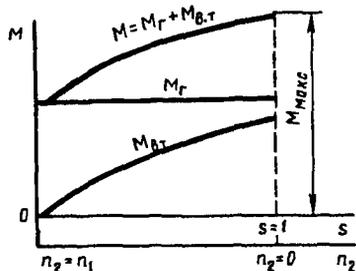


Рис. 5.16. Механические характеристики гистерезисного двигателя

обеспечивает получение гистерезисного момента достаточной величины. Только с помощью магнитотвердых сплавов типа викаллой получают большой гистерезисный момент.

Роторы гистерезисных двигателей обычно делают сборными: магнитотвердую часть выполняют в виде шихтованного или массивного кольца 1, размещенного на втулке 2 (рис. 5.17, б), которая жестко наса-

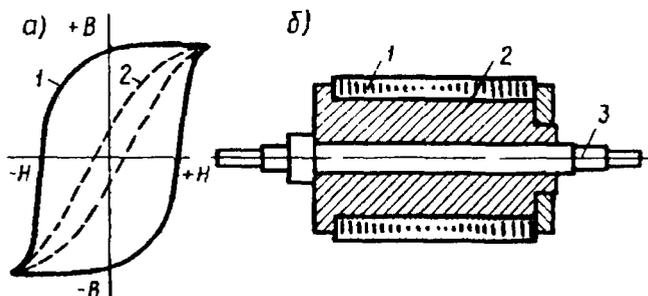


Рис. 5.17. Петля гистерезиса обычной электротехнической стали и сплава викаллой (а) и устройство сборного ротора гистерезисного двигателя (б)

жена на вал 3. В машинах с массивным ротором вращающееся поле статора наводит в роторе вихревые токи. В результате взаимодействия токов с вращающимся полем статора возникает электромагнитный момент $M_{вт}$:

$$M_{вт} = sP_{вк}/\omega_1, \quad (5.13)$$

где $P_{вк}$ — потери на вихревые токи в роторе при скольжении $s = 1$, т. е. в режиме короткого замыкания, Вт; ω_1 — угловая синхронная скорость, 1/с.

Момент $M_{вт}$ достигает наибольшего значения при неподвижном роторе ($s = 1$), т. е. при пуске двигателя. Затем по мере возрастания частоты вращения (уменьшения скольжения) момент $M_{вт}$ убывает (см. рис. 5.16), при синхронной частоте вращения он становится равным нулю.

Таким образом, при асинхронном вращении ($n_2 < n_1$) электромагнитный вращающий момент гистерезисного двигателя создается совместным действием асинхронного момента от вихревых токов $M_{вт}$ и гистерезисного момента M_r :

$$M = M_{вт} + M_r = sP_{вк}/\omega_1 + P_{rk}/\omega_1 = (sP_{вк} + P_{rk})/\omega_1 \quad (5.14)$$

Характер зависимости результирующего момента гистерезисного двигателя от скольжения $M = f(s)$ (см. рис. 5.16) определяется соотношением моментов $M_{вт}$ и M_r . При достижении ротором частоты вращения, близкой к синхронной, двигатель втягивается в синхронизм, после чего на ротор действует только гистерезисный момент.

Гистерезисный двигатель может работать с синхронной или асинхронной частотой вращения. Работа двигателя с асинхронной частотой вращения неэкономична, так как сопровождается значительными потерями на перемагничивание, которые возрастают с увеличением скольжения.

Достоинства гистерезисных двигателей — простота конструкции, бесшумная работа, эксплуатационная надежность, большой пусковой

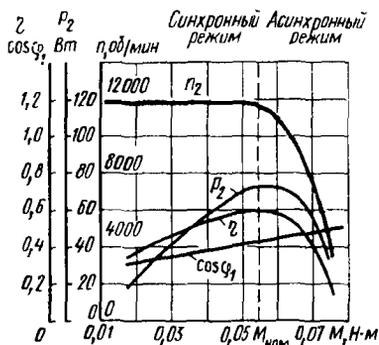


Рис. 5.18. Рабочие характеристики гистерезисного двигателя

момент, сравнительно высокий КПД, большая кратность пускового тока ($I_p/I_{ном} = 1,3 \div 1,4$).

Недостатки гистерезисных двигателей — низкий коэффициент мощности ($\cos \varphi_1 = 0,4 \div 0,5$) и сравнительно высокая стоимость. Кроме того, гистерезисные двигатели при резких колебаниях нагрузки на валу склонны к качаниям, что создает неравномерность вращения ротора. Это объясняется отсутствием у гистерезисных двигателей пусковой обмотки, которая при резких коле-

баниях нагрузки оказывала бы на ротор двигателя успокаивающее (демпфирующее) действие (см. § 5.2). Наибольшие качания бывают в гистерезисных двигателях с шихтованным ротором, в котором величина вихревых токов в значительной степени ограничена.

Отечественной промышленностью изготавливаются гистерезисные двигатели на частоту переменного тока 50, 400 и 500 Гц, с трех-

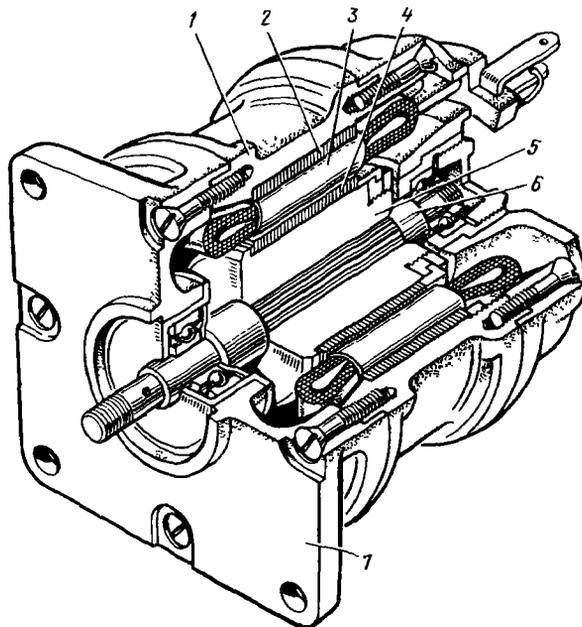


Рис. 5.19. Устройство гистерезисного двигателя

фазной или двухфазной обмоткой статора. Анализ рабочих характеристик (рис. 5.18) трехфазного гистерезисного двигателя мощностью 70 Вт, включенного в сеть переменного тока частотой 400 Гц и напряжением 200 В, показывает, что при переходе из синхронного режима в асинхронный резко уменьшаются полезная мощность P_2 , частота вращения n_2 и КПД η двигателя.

Таким образом, стабильная частота вращения гистерезисного двигателя обеспечивается лишь при нагрузке на его вал, не превышающей номинальную.

На рис. 5.19 показано устройство гистерезисного двигателя. В корпус 1 запрессован шихтованный сердечник статора 2 с обмоткой 3, ротор двигателя сборный, состоит из магнитотвердого кольца 4, втулки 5 и вала 6, подшипниковый щит 7 обеспечивает фланцевое крепление двигателя в месте его установки.

■ 5.7. Реактивно-гистерезисные двигатели

В приборной технике и автоматических устройствах для привода программных и временных механизмов (лентопротяжные механизмы, реле времени, электрические часы и т. п.) широко применяются реактивно-гистерезисные двигатели. Такой двигатель имеет двухполюсный сердечник статора 1 с явно выраженными полюсами (рис. 5.20). Сердечник статора разъемный, состоит из двух половин, что упрощает установку однофазной обмотки 2 трансформаторного типа. Полюсы сердечника статора оканчиваются полюсными наконечниками. Каждый полюс разделен продольным пазом на две равные части, на одной из частей расположены короткозамкнутые медные витки (экраны) 3, обеспечивающие получение в однофазном двигателе вращающегося магнитного поля (см. § 4.5). Ротор 4 включает шесть-семь пластин (дисков) толщиной по 0,4 мм из закаленной магнитотвердой стали. Продольная прорезь на пластинах позволяет надежно закрепить их на валу. Кольцевой обод на пластинах ротора обеспечивает получение асинхронного (за счет дей-

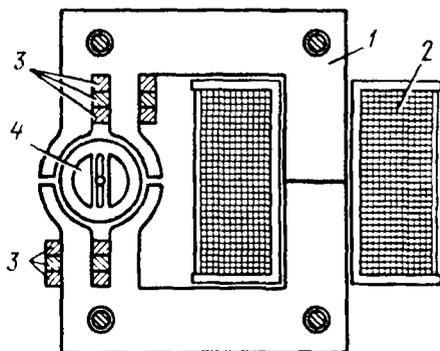


Рис. 5.20. Устройство реактивно-гистерезисного двигателя

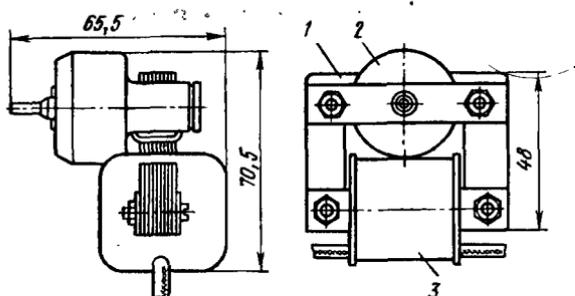


Рис. 5.21. Внешний вид двигателя серии ДСД:
1 — сердечник, 2 — редуктор, 3 — обмотка

ствия вихревых токов) и гистерезисного моментов. Диаметральная перемычка на пластинах ротора делает ротор явнополюсным, что обеспечивает получение на роторе еще и реактивного момента. Таким образом, в реактивно-гистерезисном двигателе создается три электромагнитных вращающих момента. При пуске двигателя на ротор действуют два момента — асинхронный и гистерезисный. После пуска ротор втягивается в синхронизм и вращается с неизменной синхронной частотой под действием моментов реактивного и гистерезисного. Гистерезисный момент при синхронном вращении ротора в 2—3 раза больше реактивного.

Ротор реактивно-гистерезисного двигателя вращается только в одну сторону — от незэкранированной части полюса статора к экранированной.

Вал двигателя связан с редуктором, понижающим частоту вращения и увеличивающим вращающий момент. Ротор с редуктором заключен в герметичный корпус из немагнитного металла.

Промышленностью изготавливаются однофазные синхронные реактивно-гистерезисные двигатели серий ДСД и ДСДР. В двигателях серии ДСДР на полюсах статора вместо короткозамкнутых экранирующих витков расположены четыре катушки, по две на каждом полюсе на обеих его половинах. Концы катушек выведены на клеммную панель. Замыкая ту или иную пару катушек, осуществляют реверс (изменение направления вращения) двигателя.

Синхронные реактивно-гистерезисные двигатели ДСД и ДСДР имеют низкие энергетические показатели (КПД и $\cos \varphi_1$) при сравнительно больших габаритных размерах и массе. Однако благодаря простоте конструкции и технологичности они имеют массовое производство и широко применяются в автоматических устройствах. Они изготавливаются на частоту переменного тока, 50 Гц напряжением 12, 24, 36, 127 или 220 В. Механическая мощность таких двигателей не превышает 14 мВт. На рис. 5.21 показан внешний вид двигателя ДСД.

Контрольные вопросы

1. Какими силами создается электромагнитный момент в синхронном двигателе?
2. В чем состоит процесс асинхронного пуска синхронного двигателя?
3. Какие виды потерь происходят в синхронном двигателе?
4. Почему электромагнитный момент синхронного двигателя при явнополосном роторе больше, чем при неявнополосном?
5. Почему угловая характеристика синхронного явнополосного двигателя не синусоидальна?
6. Какова конструкция синхронных двигателей с постоянными магнитами?
7. Почему при пуске синхронных двигателей с постоянными магнитами возникает тормозной момент?
8. Что такое момент входа в синхронизм и момент выхода из синхронизма?
9. Как будут изменяться рабочие и пусковые свойства синхронного реактивного двигателя при увеличении впадин на роторе?
10. Почему ротор синхронного гистерезисного двигателя неявнополосный, а ротор СРД — явнополосный?

Глава 6

Коллекторные машины

6.1. Принцип действия машины постоянного тока

Отличительным конструктивным признаком коллекторной машины постоянного тока является наличие коллектора, через который осуществляется связь рабочей обмотки (обмотки якоря) с нагрузкой (режим генератора) или источником питания (режим двигателей). Коллектор — это механический преобразователь. В комплекте с контактными щетками он преобразует постоянный ток в переменный или наоборот.

Рассмотрим принцип действия машины постоянного тока в генераторном режиме, когда подводимая механическая энергия преобразуется в электрическую энергию постоянного тока. Для этого воспользуемся упрощенной моделью машины постоянного тока (рис. 6.1). В магнитном поле постоянного магнита вращается стальной сердечник, в продольных пазах которого расположен диаметральный виток $abcd$ со сторонами ab и cd . Начало d и конец a этого витка присоединены к двум взаимно изолированным медным полукольцам, образующим коллектор, который вращается вместе со стальным цилиндром. По коллектору скользят неподвижные в пространстве контакт-

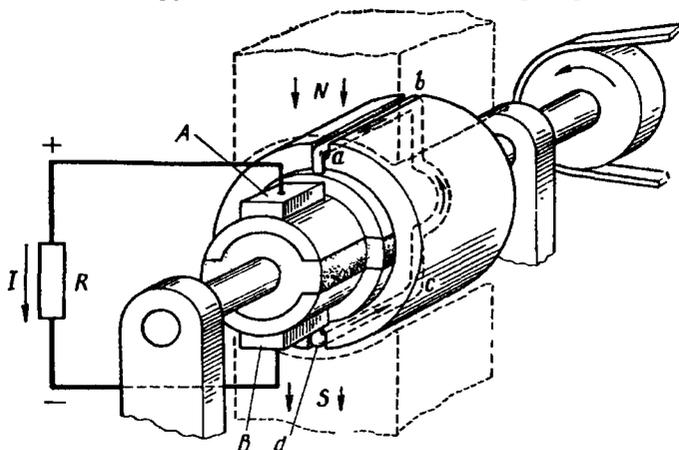


Рис. 6.1. Упрощенная модель коллекторной машины

ные щетки A и B , от которых отходят провода к потребителю энергии R . Стальной сердечник с витком (обмоткой) и коллектором образует вращающуюся часть машины постоянного тока — якорь. Если с помощью какой-либо внешней силы вращать якорь, то стороны витка будут пересекать магнитное поле полюсов с индукцией B и в обмотке якоря наведется ЭДС, E ,

$$e = 2Blv, \quad (6.1)$$

где v — скорость перемещения пазовых сторон витка, м/с; l — длина стороны витка, м.

Так как длина и скорость перемещения пазовых сторон обмотки якоря неизменны, то ЭДС e обмотки якоря прямо пропорциональна B , а форма графика ЭДС определяется законом распределения магнитной индукции B в воздушном зазоре между поверхностью якоря и полюсами магнита. Так, например, магнитная индукция в точках зазора, лежащих на оси полюсов, имеет максимальные значения: под северным магнитным полюсом положительное и под южным — отрицательное. В точках n и n' , лежащих на геометрической нейтрали, т. е. на линии, проходящей через середину межполюсного пространства, магнитная индукция $B = 0$ (см. рис. 6.4).

Допустим, что магнитная индукция в воздушном зазоре рассматриваемой модели распределена синусоидально: $B = B_{\max} \sin \alpha$, тогда ЭДС витка при вращении якоря будет также изменяться по синусоидальному закону. Угол α определяет изменение положения якоря по отношению к исходному. На рис. 6.2, a показан ряд положений витка $abcd$ (обмотки) в различные моменты времени за один оборот якоря. При $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 180^\circ$, $\alpha = 360^\circ$ ЭДС якоря равна нулю, а при $\alpha = 90^\circ$ и

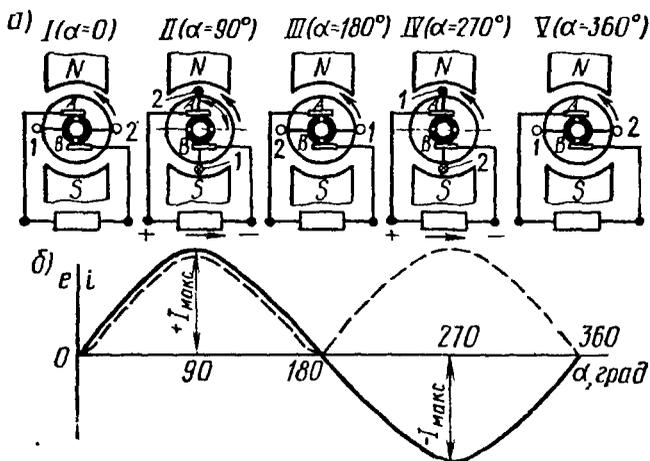


Рис. 6.2. К принципу действия генератора постоянного тока

$\alpha = 270^\circ$ имеет максимальные значения, причем в первом случае положительное, а во втором — отрицательное. Таким образом, в обмотке якоря генератора постоянного тока наводится переменная ЭДС, а следовательно, при подключении нагрузки по обмотке будет проходить переменный ток с частотой f_1 (рис. 6.2, б, сплошная линия). За время второго полуоборота якоря, когда ЭДС и ток в обмотке якоря отрицательны, ЭДС и ток во внешней цепи генератора (в нагрузке) не меняют своего направления, т. е. остаются положительными, как и в течение первой половины оборота якоря. Действительно, при $\alpha = 90^\circ$ щетка *A* соприкасается с коллекторной пластиной проводника *d*, расположенного под полюсом *N*, и имеет положительный потенциал, а щетка *B* — отрицательный, так как она соприкасается с пластиной коллектора, соединенной со стороной *a* витка, находящейся под полюсом *S*. При $\alpha = 270^\circ$, когда стороны *a* и *d* поменялись местами, щетки *A* и *B* сохраняют неизменной свою полярность, потому что полукольца коллектора также поменялись местами и щетка *A* по-прежнему имеет контакт с коллекторной пластиной, связанной со стороной, находящейся под полюсом *N* (сторона *a*), а щетка *B* — с коллекторной пластиной, связанной со стороной, находящейся под полюсом *S* (сторона *d*).

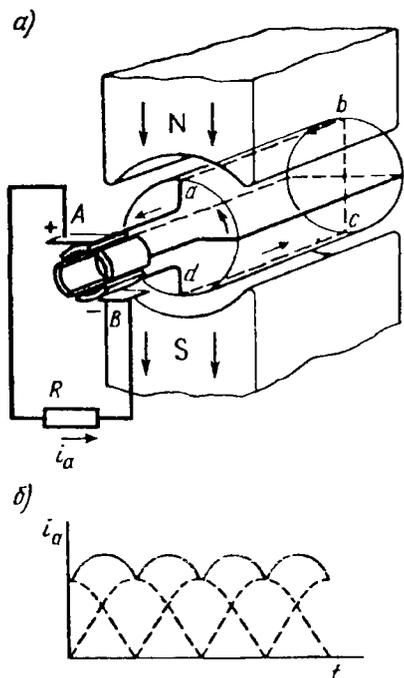


Рис. 6.3. Модель коллекторной машины с двумя витками в обмотке якоря

В результате ток во внешней цепи не изменит своего направления (рис. 6.2, б, пунктирная линия), т. е. переменный ток обмотки якоря с помощью коллектора и щеток преобразуется в постоянный ток.

Ток во внешней цепи рассматриваемого генератора постоянен лишь по направлению, а его величина изменяется, т. е. ток пульсирует.

Пульсации тока и ЭДС значительно ослабляются, если обмотку якоря выполнить из большого числа равномерно распределенных по поверхности сердечника витков и увеличить соответственно число коллекторных пластин. Например, при двух витках на сердечнике якоря (четырех пазовых сторонах), оси которых смещены относительно друг друга на угол 90° , и четырех пластинах в коллекторе (рис. 6.3, а) ток во внешней цепи ге-

нератора пульсирует с удвоенной частотой $2f_1$, но глубина пульсаций значительно сокращена (рис. 6.3, б). Если витков в обмотке якоря 12—16, то ток на выходе генератора практически постоянен.

Генераторы постоянного тока имеют ограниченное применение, так как в качестве источников постоянного тока целесообразнее использовать полупроводниковые выпрямительные устройства. Поэтому коллекторные машины преимущественно используются в качестве двигателей.

На рис. 6.4 показан поперечный разрез упрощенной модели коллекторного двигателя. Если к щеткам A и B подвести напряжение U от источника постоянного тока, то в обмотке якоря появится ток i_a . В результате взаимодействия тока i_a в сторонах a и d витка с полем постоянного магнита (полем возбуждения) появятся электромагнитные силы, H

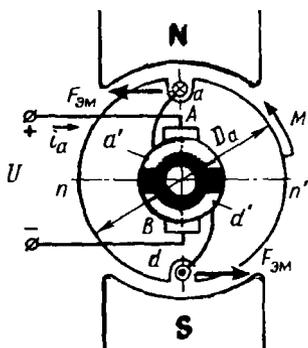


Рис. 6.4. К принципу действия двигателя постоянного тока

$$F_{эм} = Bli_a, \quad (6.2)$$

создающие электромагнитный момент, $H \cdot м$,

$$M = F_{эм} N_a D_a / 2, \quad (6.3)$$

где N_a — число сторон в обмотке якоря; D_a — диаметр сердечника якоря, м.

Под действием этого момента якорь приходит во вращение. После поворота якоря на 180° электромагнитные силы $F_{эм}$ и электромагнитный момент M не изменяют своего направления, так как при переходе каждого пазового проводника обмотки якоря из зоны одного магнитного полюса в зону другого полюса постоянного магнита в этих проводниках меняется направление тока. Объясняется это тем, что при повороте якоря на 180° пластины a' и d' коллектора меняются местами.

Таким образом, назначение коллектора и щеток в двигателе постоянного тока состоит в том, чтобы изменять направление тока в витках обмотки якоря при их переходе из зоны одного магнитного полюса в зону другого полюса, при этом направление электромагнитных сил, создающих электромагнитный вращающий момент M , остается неизменным.

При прохождении пазовых сторон a и d витка обмотки якоря через точки n и n' , лежащие на геометрической нейтрали, электромагнитные силы $F_{эм} = 0$, так как магнитная индукция в этих точках $B = 0$, а электромагнитный момент при этом равен нулю: $M = 0$. Однако с

увеличением числа витков вращение якоря становится равномерным. Например, при двух витках в обмотке якоря и четырех пластинах в коллекторе (см. рис. 6.3) электромагнитный момент двигателя при любом пространственном положении якоря не равен нулю ($M \neq 0$). Так, если в точках геометрической нейтрали n и n' окажутся две пазовые стороны одного витка обмотки якоря, то электромагнитный момент двигателя будет создаваться электромагнитными силами, действующими на пазовые стороны другого витка, которые в этот момент времени будут находиться под серединой полюсов постоянного магнита, где магнитная индукция B максимальна.

■ 6.2. Устройство силового двигателя постоянного тока

Силовой коллекторный двигатель постоянного тока состоит из неподвижного статора и вращающегося якоря. Статор включает станину и главные полюса с полюсными катушками. Обычно в коллекторных двигателях малой мощности с электромагнитным возбуждением применяют двухполюсные статоры ($2p = 2$) двух конструкций — сборный или цельный шихтованный. Станина сборного статора (рис. 6.5, *а*) представляет собой цельнотянутую трубу 1 , к внутренней поверхности которой винтами прикрепляются полюсы. Сердечники 2 главных полюсов делают в виде стального бруса либо набирают из штампованных стальных пластин толщиной 0,5—1 мм. Каждый главный полюс на стороне, обращенной к якорю 4 , имеет полюсный наконечник, обеспечивающий требуемое распределение магнитной индукции в воздушном зазоре. Полюсные катушки 3 соединяются последовательно и образуют обмотку возбуждения, при подключении которой к источнику постоянного тока в магнитной системе двигателя создается магнитное поле.

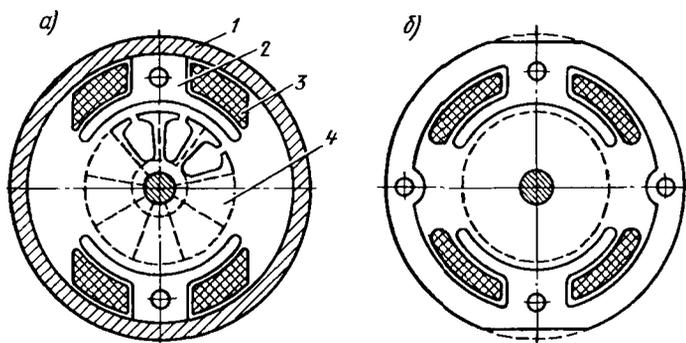


Рис. 6.5. Статоры коллекторных двигателей сборный (*а*), шихтованный (*б*)

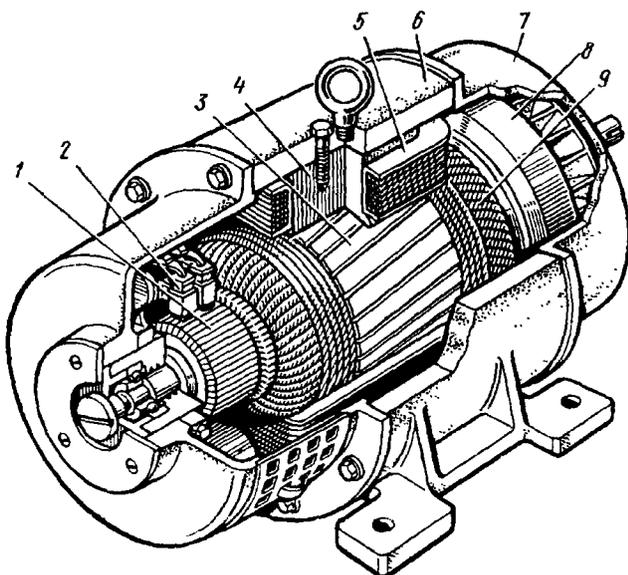


Рис. 6.6. Устройство двигателя постоянного тока защищенного исполнения

В двигателях постоянного тока мощностью до 200—250 Вт обычно применяют шихтованный статор (рис. 6.5, б), представляющий собой пакет пластин сложной конфигурации из листовой электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм, в которых станина и главные полюсы отштампованы заодно. Для придания пакету необходимой прочности его скрепляют не менее чем четырьмя шпильками.

На рис. 6.6 показано устройство коллекторного двигателя постоянного тока защищенного исполнения с самовентилирующей. Статор имеет сборную конструкцию и состоит из станины 6, главных полюсов 4 с полюсными катушками 5 каркасного типа, т. е. намотанных на каркас из изоляционного материала. Якорь двигателя включает сердечник, обмотку якоря, коллектор и вал.

Сердечник якоря 3 — это цилиндр, набранный из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм (рис. 6.7). Перед сборкой эти листы покрывают специальным изоляционным лаком. Такая конструкция сердечника якоря позволяет значительно ослабить вихревые токи, возникающие в нем при его перемагничивании в процессе вращения в магнитном поле. В продольные пазы сердечника якоря уложены пазовые стороны секций обмотки якоря. Часто пазы якоря делают со скосом, что ослаб-

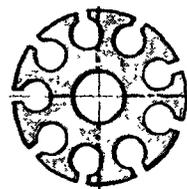


Рис. 6.7. Лист сердечника якоря

ляет пульсацию магнитного потока в воздушном зазоре и уменьшает вибрации и шум, сопровождающие работу двигателя.

Обмотка якоря 9 (см. рис. 6.6) состоит из секций (катушек), выполненных медным изолированным проводом, обычно круглого сечения. Пазовые стороны секций закрепляют в пазах сердечника якоря посредством гетинаксовых клиньев или банджа. С двух сторон сердечника якоря расположены лобовые части обмотки якоря. Со стороны коллектора они подключаются к его пластинам, а со стороны, противоположной коллектору, соединяют пазовые стороны секций. Для закрепления лобовых частей на них накладывают бандаж из стеклотенты.

Коллектор 1 двигателя (см. рис. 6.6) имеет цилиндрическую форму и состоит из медных пластин, изолированных друг от друга миканитовыми прокладками. В коллекторных двигателях малой мощности применяют коллекторы на пластмассе (рис. 6.8), медные пластины 1 и миканитовые прокладки которых запрессованы в пластмассу 2. Основание коллектора — стальная втулка 4, напрессованная на вал двигателя. В двигателях с повышенной частотой вращения для придания коллектору большей прочности в коллекторе применяют армирующие кольца 3. Рабочая поверхность коллектора, по которой скользят контактные щетки, должна быть чистой. Чтобы миканитовые прокладки при срабатывании медных пластин не выступали над рабочей поверхностью коллектора, что нарушало бы нормальную работу коллектора и двигателя, между каждой парой смежных медных пластин фрезеруют канавку («дорожку») на глубину до 1,5 мм. Коллекторные пластины со стороны сердечника якоря имеют выступы, называемые «петушками», к ним присоединяют секции обмотки. Щетки 2 (см. рис. 6.6) расположены в щеткодержателях и прижимаются к коллектору пружинами. В некоторых двигателях малой мощности применяют трубчатые щеткодержатели (рис. 6.9), вмонтированные в подшипниковый щит двигателя и состоящие из металлической втулки 1, пружины 3 и пластмассового колпака 2, навинчивающегося на втулку.

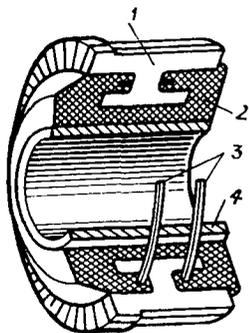


Рис. 6.8. Устройство коллектора на пластмассе

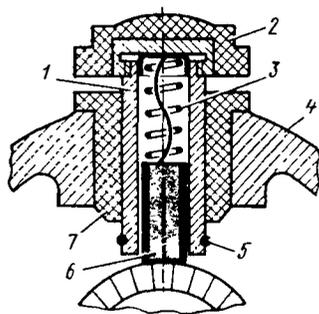


Рис. 6.9. Устройство щеткодержателя

Металлическая втулка электрически связана со щеткой, изолируется от подшипникового щита с помощью втулки 7. Зажим 5 щеткодержателя соединен с одной из клемм коробки выводов, расположенной на боковой или верхней части станины.

Передний (со стороны коллектора) и задний 7 (со стороны выступающего конца вала) подшипниковые щиты двигателя (см. рис. 6.6) крепятся болтами к станине. В центральной части щитов сделаны расточки под подшипники. В двигателях малой мощности применяют шариковые подшипники качения. В переднем подшипниковом щите сделаны окна, прикрываемые стальной пластиной или лентой. Через окна можно периодически осматривать коллектор и щетки, не разбирая двигатель.

Для подключения двигателя к питающей сети и присоединения регулирующей аппаратуры имеется коробка выводов, расположенная на боковой или верхней поверхности станины. В двигателях весьма малой мощности вместо коробки выводов на корпусе или на одном из подшипниковых щитов укрепляют клеммную панель или выводят наружу пучок маркированных проводов.

Двигатель (см. рис. 6.6) снабжен центробежным вентилятором 8, посредством которого воздух «прогоняется» через внутреннюю полость двигателя, где отбирает теплоту от обмоток и сердечников. В верхнюю часть станины ввернуто кольцо (рым-болт) используемое при транспортировке или монтаже двигателя. Однако двигатели малой мощности не имеют такого кольца ввиду их небольшой массы. В нижней части станины имеются лапы для установки и закрепления двигателя. Двигатель снабжают болтом заземления для обеспечения электробезопасности при обслуживании.

Устройство коллекторного двигателя (рис. 6.10) мощностью 200 Вт с шихтованной станиной отличается от ранее рассмотренного конструкцией отдельных деталей и узлов. Так, наружная оболочка и подшипниковые щиты выполнены из алюминиевого сплава.

Помимо двигателей с электромагнитным возбуждением в устройствах автоматики используются двигатели малой мощности с возбуждением постоянными магнитами. Мощность этих двигателей обычно не превышает нескольких десятков ватт. Отсутствие обмотки возбуждения упрощает конструкцию двигателей и способствует повышению их КПД и надежности.

Существует несколько разновидностей магнитных систем этих двигателей, отличающихся конфигурацией постоянных магнитов и их размещением на статоре:

— магнитная система с радиальными магнитами (рис. 6.11, а) конструктивно наиболее проста, но не обеспечивает получения большой МДС постоянного магнита, так как пространство между магнитами остается неиспользованным,

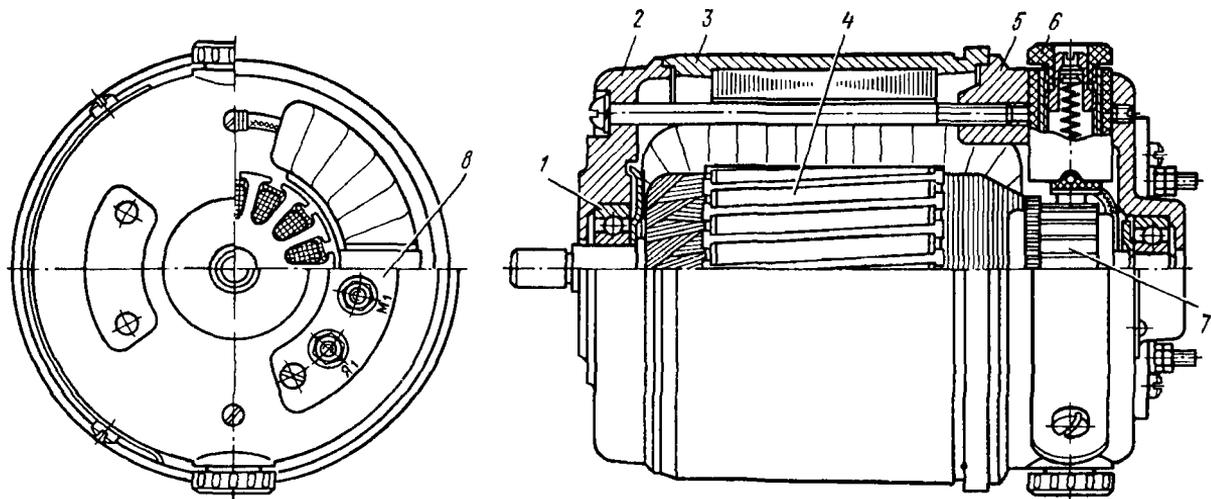


Рис. 6.10. Устройство двигателя постоянного тока малой мощности серии СЛ с шихтованной станиной:
 1 — шарикоподшипник, 2 — подшипниковый щит задний, 3 — статор, 4 — якорь, 5 — подшипниковый щит задний, 6 — щеткодержатель, 7 — коллектор, 8 — клеммная колодка

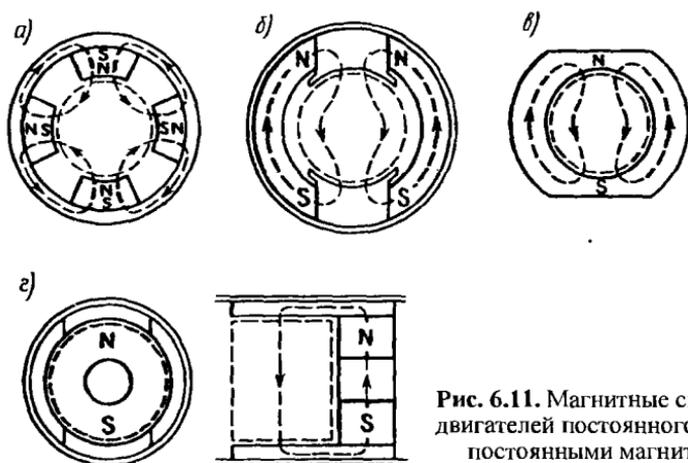


Рис. 6.11. Магнитные системы двигателей постоянного тока с постоянными магнитами

— магнитная система с подковообразными магнитами (рис. 6.11, б) обеспечивает получение большой МДС и лучшее использование межполюсного пространства,

— магнитная система с кольцевым магнитом (рис. 6.11, в) наиболее рациональна и имеет наибольшее применение. Площадки у полюсов постоянного магнита сделаны для уменьшения массы магнита, так как материал в этих частях магнита используется лишь частично. Магнитная система с торцовым магнитом (рис. 6.11, г) обеспечивает двигателю минимальный диаметр за счет увеличения его длины.

На рис. 6.12 показано устройство коллекторного двигателя постоянного тока с кольцевой магнитной системой постоянного магнита 1. Подшипниковый щит 3 со стороны коллектора выполнен из пластмассы, а щит 2 — из алюминия. Оба шарикоподшипника наружными кольцами запрессованы в стальные армирующие втулки. Изготовление постоянных магнитов из современных магнитотвердых самарий-кобальтовых и платиновых сплавов с большой удельной магнитной энергией позволяет получать двигатели, возбуждаемые постоянными магнитами мощностью до 50 Вт и более.

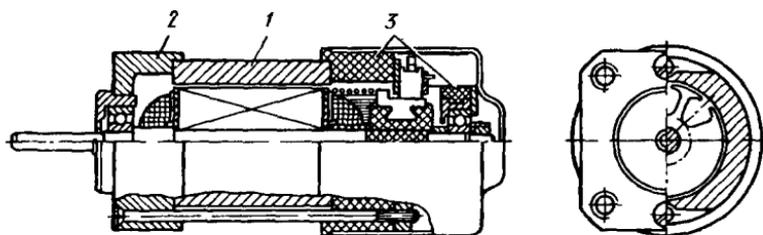


Рис. 6.12. Устройство коллекторного двигателя с постоянными магнитами

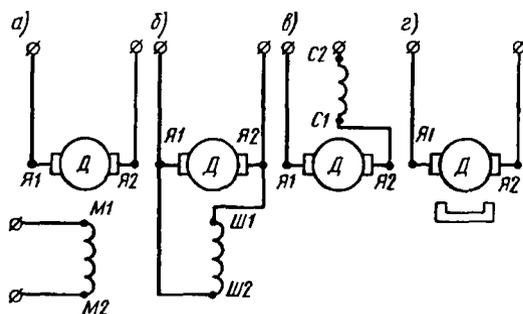


Рис. 6.13. Схемы подключения обмоток возбуждения двигателей

Двигатели с постоянными магнитами имеют недостатки, ограничивающие в ряде случаев их применение: а) невозможность регулировать частоту вращения двигателя изменением магнитного потока возбуждения; б) при мощности, превышающей 40—50 Вт, их габаритные размеры и масса оказываются больше, чем у двигателей с электромагнитным возбуждением; в) материалы для изготовления постоянных магнитов дефицитны и дорогостоящи.

В двигателях малой мощности применяются следующие схемы подключения обмотки возбуждения к источнику питания: независимая (параллельная), когда обмотка возбуждения *ОВ* не соединена электрически с обмоткой якоря и получает питание от постороннего источника постоянного тока (рис. 6.13, а) или включается параллельно обмотке якоря (рис. 6.13, б), последовательная, когда обмотка возбуждения *ОВ* включена последовательно с обмоткой якоря (рис. 6.13, в). Принципиальная схема двигателя с возбуждением постоянными магнитами показана на рис. 6.13, г. По эксплуатационным свойствам эти двигатели аналогичны двигателям с независимым возбуждением. Принята следующая маркировка выводов обмоток: обмотка якоря — Я1 и Я2, обмотка возбуждения независимая — М1 и М2, обмотка возбуждения параллельная (шунтовая) — Ш1 и Ш2, обмотка возбуждения последовательная (серийная) — С1 и С2.

Сравнивая коллекторные силовые двигатели постоянного тока с бесколлекторными (асинхронными и синхронными), следует отметить, что коллекторные двигатели выгодно отличаются: возможностью получения различных частот вращения, в том числе и свыше 3000 об/мин, и простотой ее регулирования в широком диапазоне; возможностью создавать значительные пусковые и рабочие моменты.

Эти свойства коллекторных двигателей способствуют их использованию в устройствах автоматики, несмотря на существенные недостатки, обусловленные наличием щеточно-коллекторного узла, т. е. скользящих контактов, являющихся источником искрообразования:

помехи радиоприему, требующие применения специальных мер для их подавления (см. § 6.6); износ, подгорание и загрязнение щеток и коллектора, приводящие к снижению надежности и сокращению срока службы двигателя, недопустимость применения этих двигателей в пожароопасных и взрывоопасных средах.

■ 6.3. Основные уравнения двигателя постоянного тока

В процессе работы коллекторного двигателя постоянного тока в его обмотке якоря наводится ЭДС (рис. 6.14). В результате взаимодействия тока i_a в проводнике a обмотки якоря с внешним магнитным полем возникает электромагнитная сила $F_{эм}$, создающая электромагнитный момент M , который приводит якорь во вращение (в рассматриваемом случае якорь вращается против часовой стрелки). При этом пазовый проводник пересекает силовые линии поля возбуждения с магнитной индукцией B , и в соответствии с явлением электромагнитной индукции в проводнике наводится ЭДС e_a , направление которой определяют по правилу «правой руки». Электродвижущая сила e_a , наведенная в пазовом проводнике, направлена встречно току, проходящему по этому проводнику. Поэтому ЭДС, наведенную в обмотке якоря двигателя, называют противо-ЭДС. Противо-ЭДС (E) прямо пропорциональна основному магнитному потоку Φ и частоте вращения якоря:

$$E_a = c_e \Phi n, \quad (6.4)$$

где c_e — постоянный коэффициент, определяемый конструктивными параметрами двигателя.

Рассмотрим электрическую цепь обмотки якоря (рис. 6.15), по которой протекает ток I_a . Применив второй закон Кирхгофа, получим уравнение напряжения двигателя

$$U = E_a + I_a \sum r, \quad (6.5)$$

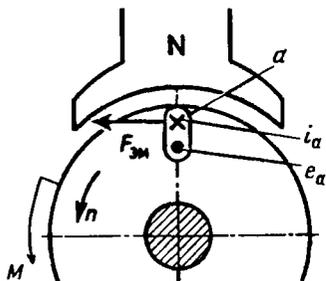


Рис. 6.14. Направление противо-ЭДС в обмотке якоря двигателя

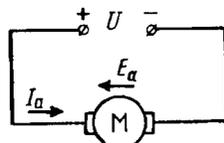


Рис. 6.15. Электрическая цепь якоря

где Σr — сумма сопротивлений в цепи обмотки якоря, в которую входят обмотки якоря, добавочных полюсов и возбуждения (для двигателя последовательного возбуждения) и щеточный контакт.

Преобразуя (6.5), получим формулу тока в обмотке якоря, А,

$$I_a = (U - E_a) / \Sigma r. \quad (6.6)$$

Используя (6.4) и (6.5), получим формулу частоты вращения якоря двигателя

$$n = \frac{U - I_a \Sigma r}{c_c \Phi}, \quad (6.7)$$

которая прямо пропорциональна напряжению на обмотке якоря и U обратно пропорциональна основному магнитному потоку Φ , кроме того, зависит от падения напряжения в цепи якоря $I_a \Sigma r$.

Электромагнитная мощность двигателя, Вт,

$$P_{эм} = E_a I_a. \quad (6.8)$$

Электромагнитный момент, Н · м,

$$M = P_{эм} / \omega_a = c_m \Phi I_a, \quad (6.9)$$

где $\omega_a = 2\pi n$ — угловая скорость вращения якоря, 1/с; c_m — постоянный коэффициент, определяемый конструктивными параметрами двигателя.

Таким образом, электромагнитный момент двигателя постоянного тока прямо пропорционален основному магнитному потоку Φ и току в обмотке якоря I_a .

■ 6.4. Реакция якоря

В процессе работы двигателя обмотки возбуждения и якоря создают магнитные поля. Результирующее магнитное поле двигателя можно рассматривать как сумму двух магнитных полей.

При идеальном холостом ходе, когда ток якоря $I_a \approx 0$, в двигателе действует только МДС обмотки возбуждения F_b , которая создает магнитное поле, симметрично распределенное относительно оси полюсов. График распределения магнитной индукции в зазоре B_δ представляет собой трапецеидальную кривую (рис. 6.16, а). Если двигатель нагрузить, то по обмотке якоря потечет ток и появится МДС якоря F_a , вектор которой неподвижен и направлен перпендикулярно оси полюсов. МДС создает магнитное поле якоря (рис. 6.16, б). Если щетки двигателя расположены на геометрической нейтральной mn' , то вектор МДС F_a направлен по геометрической нейтральной, т. е. по поперечной оси двигателя. На рис. 6.16, б показан также график распределения

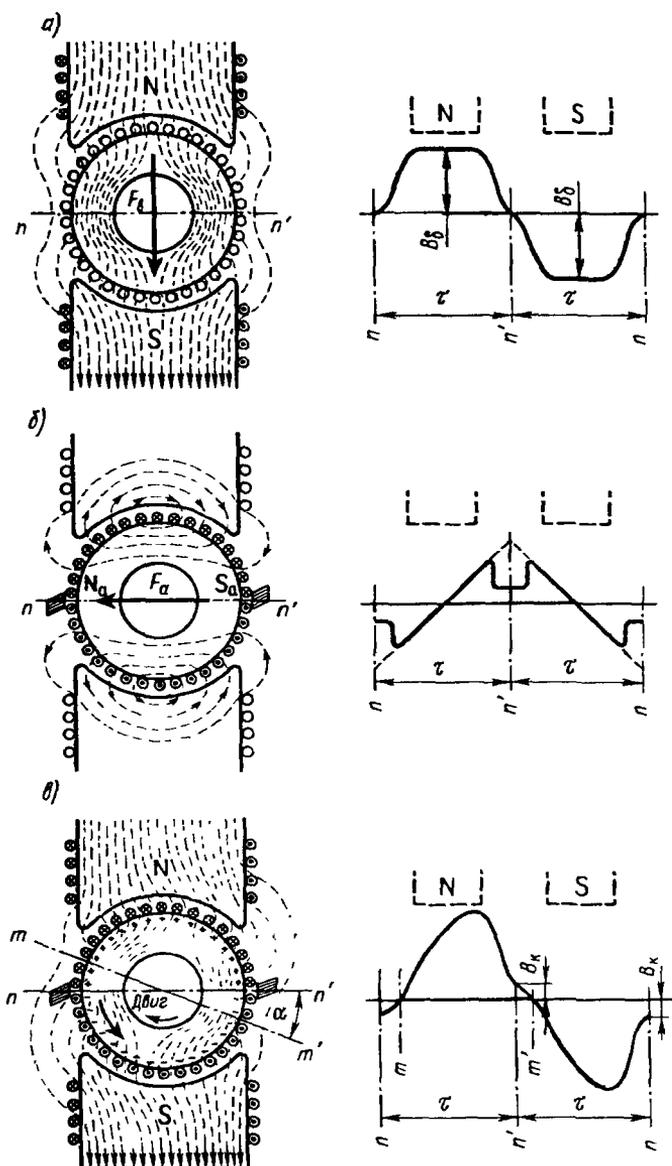


Рис. 6.16. Картины магнитных полей и графики магнитной индукции машины постоянного тока

магнитной индукции поля якоря в зазоре. Сердечник якоря намагничивается, и его участки, расположенные по геометрической нейтральной,

приобретают полярность N_a и S_a . Уменьшение магнитной индукции поля якоря по геометрической нейтральной (в точках n и n') объясняется резким увеличением воздушного зазора в межполюсном пространстве двигателя.

В реальных условиях работы с нагрузкой в двигателе одновременно действуют МДС F_b и F_a , которые создают результирующее поле двигателя.

Воздействие магнитного поля якоря на магнитное поле возбуждения называют реакцией якоря.

На рис. 6.16, в показана картина результирующего магнитного поля и график распределения магнитной индукции поля в зазоре.

Из сравнения картин магнитного поля и графиков распределения магнитной индукции в зазоре для режимов идеального холостого хода (рис. 6.16, а) и нагрузки (рис. 6.16, в) следует, что реакция якоря искажает магнитное поле двигателя. Физическая нейтраль mm' результирующего магнитного поля смещается на угол α относительно геометрической нейтральной nn' . Поэтому в точках n и n' магнитная индукция отличается от нуля и поэтому в сторонах секций обмотки якоря при их переходе через геометрическую нейтраль наводится ЭДС вращения $e_{вр}$, действие которой нарушает работу щеточного контакта, вызывая искрение (см. § 6.5). Искажение магнитного поля двигателя приводит к тому, что одни края полюсных наконечников и расположенные под ними зубцы якоря подмагничиваются, а другие — размагничиваются. Но так как магнитная система двигателей насыщена, подмагничивание одних краев полюсных наконечников и участка зубцового слоя якоря ограничивается, а размагничивание других краев полюсных наконечников не ограничивается. В итоге реакция якоря

вызывает некоторое уменьшение результирующего магнитного потока, т. е. размагничивание двигателя.

Влияние реакции якоря на результирующий магнитный поток зависит также от положения щеток. Когда щетки находятся на геометрической нейтральной (рис. 6.16, б), МДС якоря F_a направлена по поперечной оси и в двигателе имеет место поперечная реакция якоря. Если щетки сместить с геометрической нейтральной против направления вращения якоря, размагничивающее действие реакции якоря усилится.

Это объясняется тем, что одновременно со смещением щеток на угол β изменяется направление МДС якоря F_a (рис. 6.17). При этом МДС якоря помимо попе-

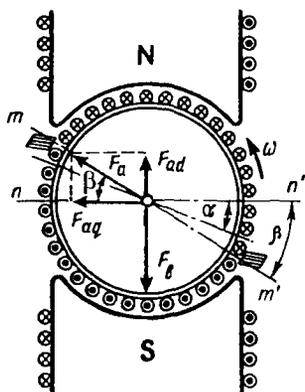


Рис. 6.17. Диаграмма МДС реакции якоря в двигателе при смещении щеток с геометрической нейтральной

речной составляющей $F_{aq} = F_a \cos \beta$ приобретает еще и продольную составляющую $F_{ad} = F_a \sin \beta$, направленную по оси полюсов встречно МДС обмотки возбуждения F_b , что ведет к размагничиванию магнитной системы двигателя. Если же щетки сместить в противоположном направлении, то продольная составляющая F_{ad} будет направлена согласно с МДС возбуждения F_b , что приведет к некоторому подмагничиванию двигателя. Но такое смещение щеток недопустимо, так как вызывает чрезмерное увеличение магнитной индукции B_k в зоне переключения тока в секциях обмотки якоря (в зоне коммутации) (см. § 6.5).

Вредное влияние реакции якоря проявляется также в том, что в моменты прохождения проводников обмотки якоря через зоны подмагниченных краев полюсных наконечников в проводниках увеличивается ЭДС. Напряжение между смежными коллекторными пластинами, к которым подключены эти проводники, может превысить допустимые пределы 25—30 В, что вызовет ионизацию пространства между коллекторными пластинами и возникновение электрической дуги на коллекторе. Описанное явление называется «круговой огонь», оно очень опасно для электродвигателя.

Таким образом, вредное влияние реакции якоря в двигателях постоянного тока заключается в следующем: уменьшается основной магнитный поток Φ , что может привести к нарушению устойчивой работы двигателя за счет роста частоты вращения якоря при увеличении нагрузки [см. (6.7)], искажается результирующее магнитное поле двигателя, что вызывает появление на геометрической нейтрали (в зоне коммутации) магнитной индукции B_k и может вызвать нарушение работы щеточного контакта и привести к недопустимому искрению на коллекторе, повышается напряжение между смежными коллекторными пластинами, что может привести к появлению «кругового огня».

Чем меньше номинальная мощность коллекторного двигателя, тем слабее проявляются нежелательные последствия реакции якоря. Поэтому в двигателях малой мощности (менее 1 кВт) не применяют специальных мер по ослаблению реакции якоря. Однако при анализе работы коллекторных двигателей последствия явления реакции якоря необходимо учитывать.

■ 6.5. Коммутация в двигателях постоянного тока и способы ее улучшения

Работа двигателя постоянного тока обычно сопровождается искрением между коллектором и щетками. Если искрение слишком интенсивное, то это вызывает подгорание пластин коллектора и щеток; эксплуатация двигателя при интенсивном искрении создает пожароопасность.

Причины, вызывающие искрение, разделяют на механические и электромагнитные. К механическим причинам относятся: слабое прижатие щеток к коллектору, негладкая или загрязненная поверхность коллектора, чрезмерный износ коллектора, вызвавший выступание миканитовых прокладок над медными пластинами, неплотное закрепление щеткодержателей. При таких неполадках нарушается контакт между коллектором и щетками, что вызывает искрение. Электромагнитные причины вызывают искрение на коллекторе вследствие физических явлений, происходящих в обмотке якоря двигателя при изменениях направления тока в секциях обмотки якоря.

При вращении якоря коллекторные пластины поочередно вступают в контакт со щетками. Переход щетки с одной пластины коллектора на другую сопровождается изменением направления тока в некоторых секциях обмотки якоря от $+i_a$ до $-i_a$. Эти секции называются *коммутируемыми*. Так как изменение направления тока в коммутируемых секциях протекает очень быстро (10^{-3} — 10^{-5} с), то в секциях наводятся ЭДС, действие которых приводит к искрению на коллекторе.

В двигателях постоянного тока мощностью до 600 Вт процесс коммутации не сопровождается значительным искрением, поэтому специальных мер для улучшения коммутации в таких двигателях не применяют. В двигателях большей мощности (до 1 кВт) для улучшения коммутации щетки смещают с геометрической нейтрали в направлении, встречном вращению якоря на угол, при котором искрение минимально. Такой способ неприменим для реверсируемых двигателей, которые работают с изменением направления вращения. В двигателях мощностью 1 кВт и более для улучшения коммутации применяют добавочные полюсы, расположенные между главными полюсами. Обмотку добавочных полюсов включают последовательно с обмоткой якоря, что обеспечивает удовлетворительную коммутацию в широком диапазоне нагрузки двигателя.

■ 6.6. Помехи радиоприему и способы их подавления

Электромагнитное излучение, сопровождающее работу коллекторного двигателя, создает помехи радиоприему.

При работе коллекторных двигателей уровень создаваемых ими радиопомех не должен превышать установленных норм. Радиопомехи от коллекторного двигателя распространяются в виде электромагнитного излучения и в виде электрических сигналов через электросеть.

Для подавления электромагнитных излучений применяют экранирование двигателя. В качестве экрана используют заземленный корпус двигателя. Если в подшипниковом щите со стороны коллектора имеются окна, то их закрывают металлической сеткой, соеди-

ненной с заземленным корпусом двигателя. Если корпус двигателя или его передний подшипниковый щит (со стороны коллектора) изготовлены из пластмассы, то немаetalлическую часть двигателя закрывают сеткой и заземляют.

Для подавления радиопомех, проникающих в электросеть, применяют симметрирование обмоток и включение фильтров. Симметрирование состоит в том, что каждую обмотку, включаемую последовательно в цепь якоря (обмотку возбуждения, обмотку добавочных полюсов и т. п.), разделяют на две равные части и присоединяют симметрично обмотке якоря, подключая к щеткам разной полярности. В качестве фильтров используют конденсаторы, включенные между каждым токонесящим проводом и заземленным корпусом двигателя (рис. 6.18).

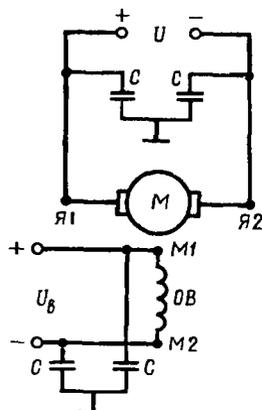


Рис. 6.18. Схема включения помехозащитных фильтров

Значение емкости конденсаторов подбирают опытным путем. Конденсаторы должны быть рассчитаны на рабочее напряжение двигателя. Предпочтительнее применять проходные конденсаторы типа КБП, у которых один из зажимов — металлический корпус, прикрепляемый непосредственно к статору двигателя и заземляемый вместе с ним. Часто конденсаторы фильтра располагают в коробке выводов двигателя.

6.7. Потери и КПД двигателей постоянного тока

Потери в коллекторных двигателях постоянного тока разделяются на основные и добавочные. Основные потери включают в себя магнитные, электрические и механические.

Магнитные потери складываются из потерь на вихревые токи $P_{вх\tau}$ и на перемагничивание (явление гистерезиса) P_g , возникающих в сердечнике якоря, вращающемся в магнитном поле:

$$P_m = P_g + P_{вх\tau} \quad (6.10)$$

Магнитные потери в якоре зависят от частоты его перемагничивания

$$f_a = pn/60, \quad (6.11)$$

толщины листов электротехнической стали, из которых набран пакет якоря, ее магнитных свойств и качества изоляции между листами пакета якоря.

Потери холостого хода — это сумма магнитных и механических потерь:

$$P_0 = P_m + P_{\text{мех}}. \quad (6.12)$$

Для двигателя независимого (параллельного) возбуждения, работающего в режиме холостого хода, электрическая мощность, потребляемая от сети, Вт,

$$P_{10} = P_0 + U_{\text{в}} I_{\text{в}}, \quad (6.13)$$

откуда потери холостого хода

$$P_0 = P_{10} - U_{\text{в}} I_{\text{в}}. \quad (6.14)$$

Таким образом, потери холостого хода можно определить экспериментально.

Электрические потери в обмотке якоря пропорциональны квадрату тока якоря:

$$P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 \sum r. \quad (6.15)$$

Электрические потери в независимой (параллельной) обмотке возбуждения

$$P_{\text{эв}} = U_{\text{в}} I_{\text{в}}, \quad (6.16)$$

где $U_{\text{в}}$ и $I_{\text{в}}$ — напряжение и ток в обмотке возбуждения.

Электрические потери в щеточном контакте

$$P_{\text{щ}} = I_{\text{я}} \Delta U_{\text{щ}}, \quad (6.17)$$

где $\Delta U_{\text{щ}}$ — падение напряжения в щетках.

Механические потери $P_{\text{мех}}$ представляют собой потери на трение в подшипниках, в щеточном контакте на коллекторе, а также потери на вентиляцию.

Добавочные потери составляют небольшую величину, которая согласно ГОСТ 183—74 принимается равной 1% от подводимой мощности P_1 .

Суммарные потери в двигателе постоянного тока

$$\sum P = P_m + P_{\text{я}} + P_{\text{щ}} + P_{\text{эв}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}. \quad (6.18)$$

Коэффициент полезного действия двигателя постоянного тока определяется из (3.24). Подводимая к двигателю мощность, Вт,

$$P_1 = U_{\text{я}} I_{\text{я}} + U_{\text{в}} I_{\text{в}}. \quad (6.19)$$

При номинальной нагрузке КПД двигателей мощностью от 100 до 1000 Вт $\eta_{\text{ном}} = 0,5 \div 0,8$, а при мощности 5,0—50 Вт $\eta_{\text{ном}} = 0,15 \div 0,40$. График зависимости КПД двигателя от нагрузки аналогичен графику для асинхронного двигателя (см. рис. 3.10).

6.8. Пуск двигателей постоянного тока

Ток в цепи якоря двигателя определяется выражением (6.6). При включении двигателя в сеть в начальный момент времени частота вращения $n = 0$, поэтому противо-ЭДС $E_a = 0$. Начальный пусковой ток в цепи якоря

$$I_n = U / \Sigma r. \quad (6.20)$$

Так как сопротивление обмоток в цепи якоря обычно невелико, то начальный пусковой ток I_n достигает больших значений по сравнению с номинальным током двигателя ($I_n/I_{ном} = 3 \div 15$). Меньшая кратность пускового тока относится к двигателям малой мощности (до 600—1000 Вт), большая — к двигателям средней мощности.

Бросок начального пускового тока в двигателях малой мощности не вызывает опасных последствий, так как кратность тока сравнительно невелика, продолжительность процесса пуска небольшая. Последнее объясняется малыми значениями моментов инерции вращающихся масс якоря и связанного с ним рабочего механизма. Поэтому двигатели малой мощности пускают в ход непосредственным включением в сеть. У двигателей большей мощности кратность пускового тока гораздо больше, время разгона якоря продолжительнее (из-за повышенного значения момента инерции вращающихся масс якоря и рабочего механизма). Большая кратность пускового тока вызывает интенсивное искрение на коллекторе. Значительный пусковой ток может привести к резкому падению напряжения в питающей сети (если мощность сети недостаточна), что неблагоприятно отразится на работе других потребителей, включенных в эту сеть. Поэтому при пуске двигателей мощностью более 1 кВт принимают меры для ограничения пускового тока; обычно это пусковые реостаты ПР, включенные последовательно в цепь якоря двигателя. Реостат ПР представляет собой добавочный резистор. Наибольшее применение получили трехзажимные пусковые реостаты (рис. 6.19), которые имеют шесть контактов. Медная шина Ш соединена с зажимом M , к которому подключают обмотку возбуждения. Благодаря шине Ш напряжение на обмотке возбуждения не зависит от положения рычага P . Рычаг связан с плюсовым выводом источника питания, имеет скользящий контакт с шиной

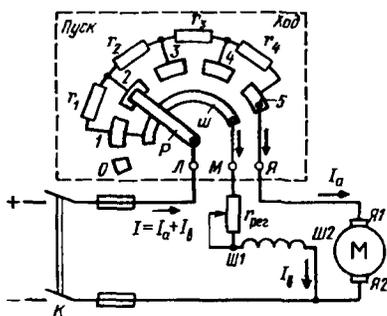


Рис. 6.19. Схема включения пускового реостата

III, так что положение рычага на любом из контактов от 1 до 5 не влияет на ток возбуждения.

Перед пуском двигателя рычаг P устанавливают на контакте 0, включают рубильники и переводят рычаг на контакт 1. Цепь якоря через наибольшее сопротивление пускового реостата $r_{np} = r_1 + r_2 + r_3 + r_4$ подключается к источнику. Одновременно в обмотке возбуждения появляется ток, и двигатель под действием пускового момента приводится во вращение. Начальный пусковой ток A ,

$$I_n = U / (\sum r + r_{np}). \quad (6.21)$$

Сопротивление r_{np} подбирают таким, чтобы кратность начально-го пускового тока не превышала 2—4. По мере разгона якоря увеличивается противо-ЭДС E_a и уменьшается ток в цепи якоря. Для обеспечения эффективности пуска рычаг P постепенно переводят на контакты 2, 3, 4 и, наконец, 5, т. е. уменьшают сопротивление ПР до $r_{np} = 0$. Рычаг P следует перемещать медленно, чтобы не вызвать чрезмерного увеличения пускового тока. Однако и длительная задержка рычага на промежуточных контактах может вызвать перегорание какого-либо из сопротивлений $r_1 - r_4$, рассчитанных на кратковременное протекание тока. В двигателях независимого и последовательного возбуждения при включении ПР используют только две клеммы: L и $Я$.

Так как вращающий момент двигателя M прямо пропорционален магнитному потоку Φ [см (6.9)], то для облегчения пуска в цепи возбуждения двигателей независимого и параллельного возбуждения следует полностью вывести реостат ($r_{per} = 0$). Поток возбуждения в этом случае приобретает наибольшее значение, и двигатель развивает необходимый пусковой момент.

В данной главе рассматриваются коллекторные двигатели малой мощности, имеющие повышенное сопротивление цепи якоря, поэтому в приведенных ниже схемах включения двигателей нет пусковых реостатов.

■ 6.9. Двигатели независимого и параллельного возбуждения

В двигателях независимого возбуждения обмотка возбуждения OB электрически не связана с обмоткой якоря (рис 6.20, *a*). Обычно напряжение возбуждения U_v отличается от напряжения в цепи якоря U . Если же напряжения равны, то обмотку возбуждения подключают параллельно обмотке якоря (рис. 6.20, *б*). Применение в электроприводе двигателя независимого или параллельного возбуждения определяется схемой электропривода. Свойства (характеристики) этих двигателей одинаковы. Эксплуатационные свойства двигателей постоянного тока определяются их рабочими и механическими характеристиками, а также регулировочными свойствами.

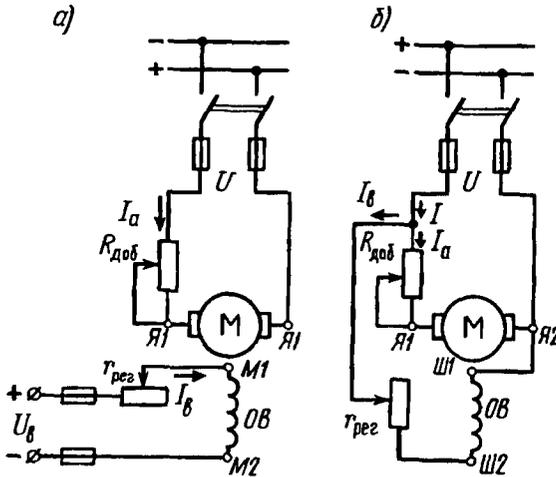


Рис. 6.20. Принципиальные схемы включения двигателей постоянного тока независимого (а) и параллельного (б) возбуждения

Рабочие характеристики представляют собой зависимость частоты вращения n , тока I_a в обмотке якоря, полезного момента M_2 от полезной мощности двигателя P_2 при неизменных значениях напряжения питания U и тока в обмотке возбуждения I_b (рис. 6.21).

Характеристика $n = f(P_2)$ имеет вид кривой, наклоненной к оси абсцисс. Такая форма характеристики объясняется тем, что с ростом нагрузки двигателя P_2 увеличивается ток якоря I_a , следовательно, возрастает падение напряжения в цепи якоря $I_a \sum r$. В итоге уменьшается числитель (6.7), что ведет к уменьшению частоты вращения. Одновременно с ростом нагрузки усиливается реакция якоря (см. § 6.4); это уменьшает основную магнитный поток Φ , что способствует увеличению частоты вращения. В двигателях малой мощности с небольшим магнитным насыщением размагничивающее влияние реакции якоря невелико и характеристика $n = f(P_2)$ имеет вид кривой, слабо наклоненной к оси абсцисс. В двигателях мощностью в несколько кВт и более реакция якоря проявляется значительно, и с ростом нагрузки в определенном диапазоне частота вращения двигателя будет возрастать, а двигатель начнет работать неустойчиво. Для преодоления этого недостатка двигатели снабжаются легкой (несколько витков) стабилизирующей обмоткой, вклю-

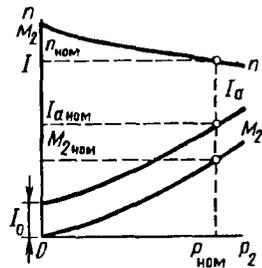


Рис. 6.21. Рабочие характеристики двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения

ченной последовательно в цепь якоря, чтобы ее МДС $F_{ст}$ была направлена согласно с МДС обмотки возбуждения F_v . При увеличении нагрузки одновременно с усилением реакции якоря увеличивается МДС $F_{ст}$, которая компенсирует размагничивающее действие реакции якоря.

График зависимости $M_2 = f(P_2)$ определяется выражением полезного момента (момента на валу), $\text{Н} \cdot \text{м}$,

$$M_2 = P_2 / \omega_a = 30 P_2 / (\pi n), \quad (6.22)$$

где ω_a — угловая скорость якоря, $1/\text{с}$.

Если $n = \text{const}$, то график $M_2 = f(P_2)$ представляет собой прямую линию, выходящую из начала осей координат. Однако с ростом нагрузки двигателя частота вращения уменьшается, это приводит к нелинейности рассматриваемой характеристики.

График зависимости $I_2 = f(P_2)$ не выходит из начала осей координат, так как в режиме холостого хода ($P_2 = 0$) двигатель потребляет из сети ток холостого хода I_0 и развивает момент холостого хода M_0 , обусловленный механическими и магнитными потерями в двигателе. Параметры двигателя, соответствующие номинальной мощности $P_{ном}$, называют номинальными: $n_{ном}$, $I_{а ном}$, $M_{2 ном}$.

Механическая характеристика двигателя представляет собой графически выраженную зависимость частоты вращения якоря n от электромагнитного момента M при неизменных напряжении питания ($U = \text{const}$) и сопротивлении реостата в цепи возбуждения ($r_{рег} = \text{const}$).

Подставим в (6.7) значение тока якоря $I_a = M / (c_a \Phi)$, тогда

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{M \sum r}{c_e c_m \Phi^2} = n_0 - \Delta n, \quad (6.23)$$

где n_0 — частота вращения двигателя при идеальном холостом ходе ($M = 0$, $I_a = 0$); Δn — изменение частоты вращения якоря под действием нагрузки двигателя $M = M_0 + M_2$.

Если пренебречь размагничивающим действием реакции якоря и принять $\Phi = \text{const}$, то механическая характеристика двигателя независимого (параллельного) возбуждения примет вид прямой, наклоненной к оси абсцисс (рис. 6.22, а, график 1). Эта характеристика называется естественной. Если в цепь якоря двигателя ввести добавочное сопротивление $R_{доб}$ (см. рис. 6.20), то механическая характеристика будет определяться выражением

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{M(\sum r + R_{доб})}{c_e c_m \Phi^2}, \quad (6.24)$$

т. е. величина n_0 [см. (6.23)] не изменится, а величина Δn возрастет, при этом угол наклона механической характеристики к оси абсцисс увеличится (рис. 6.22, а, графики 2 и 3). Полученные механические характеристики называют искусственными.

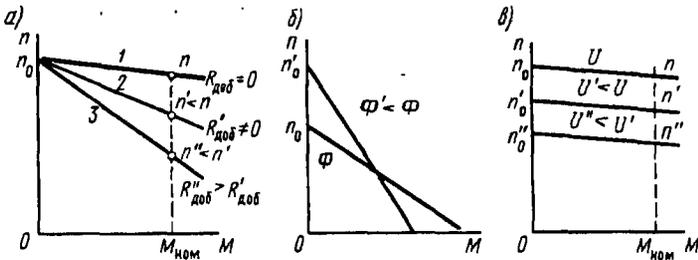


Рис. 6.22. Механические характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Естественная характеристика двигателя независимого (параллельного) возбуждения, т. е. механическая характеристика, соответствующая $R_{доб} = 0$, — «жесткая», так как при изменении нагрузки на валу двигателя частота вращения изменяется незначительно (на 5—10%). Искусственные характеристики двигателя с ростом добавочного сопротивления $R_{доб}$ в цепи якоря становятся «мягкими», так как изменение нагрузки на валу двигателя сопровождается значительными изменениями частоты вращения.

На форму механических характеристик влияет основной магнитный поток Φ . При уменьшении Φ увеличиваются частота вращения идеального холостого хода n_0 и перепад частоты вращения под влиянием нагрузки Δn . Это приводит к резкому изменению жесткости механической характеристики (рис. 6.22, б).

При изменении напряжения на якоре двигателя U изменяется частота вращения n_0 , а Δn остается постоянной. Следовательно, жесткость механических характеристик (если не учитывать реакцию якоря) не изменяется — они смещаются по высоте, оставаясь параллельными друг другу (рис. 6.22, в).

Двигатели с постоянными магнитами по своим рабочим и механическим характеристикам аналогичны двигателям с независимым возбуждением, за исключением характеристик, полученных при изменении основного магнитного потока, который в таких двигателях не регулируется.

Отечественной промышленностью изготавливается большая номенклатура коллекторных двигателей постоянного тока малой мощности независимого возбуждения. В табл. 6.1 приведены технические данные отрезка серии 2П двигателей постоянного тока закрытого исполнения с естественным охлаждением. Напряжение возбуждения двигателей 110 или 220 В независимо от номинального напряжения в цепи якоря (110, 220 или 340 В). Широкое применение в автоматизированном электроприводе постоянного тока получили коллекторные двигатели независимого возбуждения серии ПЛ 6-го габарита защищенного исполнения с самовентилиацией, их технические данные приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.1

Тип двигателя	Номинальные данные				
	Мощность, кВт	КПД	Частота вращения, об/мин, при номинальном напряжении в цепи якоря, В		
			110	220	440
2ПБ90М	0,13	0,475	800	750	750
	0,18	0,555	1000	1000	1120
	0,28	0,635	1600	1500	1600
	0,40	0,685	2360	2200	2240
	0,55	0,710	3000	3000	3150
2ПБ90L	0,18	0,530	750	750	750
	0,25	0,615	1000	1120	1060
	0,37	0,675	1500	1500	1600
	0,53	0,730	2200	2240	2200
	0,75	0,770	3000	3150	3150

Таблица 6.2

Тип двигателя	Номинальные данные				
	Мощность, Вт	Частота вращения, об/мин	КПД	Ток в цепи якоря А, при напряжении, В	
				110	220
ПЛ 061	60	1500	0.50	0.9	0,45
	90	3000	0.52	1.4	0,70
ПЛ 062	90	1500	0.55	1.3	0,65
	120	3000	0.57	1.9	0,95

■ 6.10. Регулирование частоты вращения двигателей независимого и параллельного возбуждения

Хорошие регулировочные свойства двигателей постоянного тока — одна из основных причин их применения в современном электроприводе, несмотря на существенные недостатки, обусловленные наличием у них щеточно-коллекторного узла. Лучшие регулировочные свойства у двигателей независимого и параллельного возбуждения. Способы регулирования частоты вращения характеризуются показателями диапазон и плавность регулирования, экономичность, определяемая стоимостью регулирующей аппаратуры и величиной потерь в ней.

Рассмотрим некоторые способы регулирования частоты вращения коллекторных двигателей независимого и параллельного возбуждения.

Регулирование частоты вращения изменением подводимого к обмотке якоря напряжения. Как следует из (6.7), с изменением напряжения U частота вращения изменяется. Так как превышение номинального напряжения недопустимо, то этот способ позволяет изменять

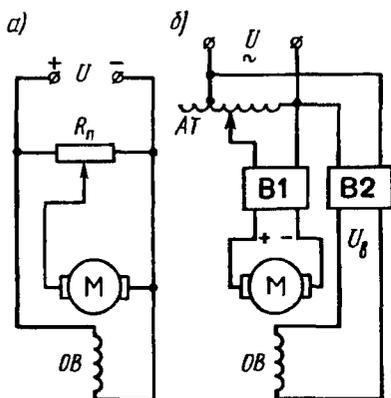


Рис. 6.23. Схемы регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока небольшой мощности

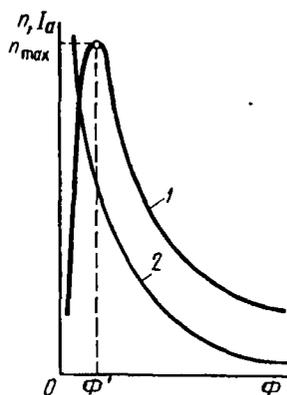


Рис. 6.24. Регулировочная характеристика двигателя независимого возбуждения

частоты вращения только в сторону уменьшения от номинальной. В двигателях мощностью до 100—120 Вт напряжение, подводимое к обмотке якоря, можно изменять посредством потенциометра (рис 6.23, а), потери в котором вследствие небольшой передаваемой мощности невелики. Если питание двигателя осуществляется через автономные выпрямители (*B1* — в цепи обмотки якоря и *B2* — в цепи обмотки возбуждения *OB*), то регулировать частоту вращения можно посредством автотрансформатора *AT*, на выход которого включен выпрямитель *B1* (рис. 6.23, б) При этом напряжение возбуждения остается неизменным. Этот способ регулирования частоты вращения успешно применяется при мощности двигателя до 500—600 Вт. Применение двигателя с возбуждением постоянными магнитами упрощает схему включения, так как отпадает необходимость в выпрямителе *B2*.

Регулирование частоты вращения изменением добавочного сопротивления в цепи обмотки якоря. Этот способ регулирования также позволяет изменять частоту вращения только в сторону уменьшения от номинальной и осуществляется посредством реостата $R_{доб}$ (см. рис. 6.20). Недостатки рассматриваемого способа: значительные потери на нагрев реостата ($I_a^2 R_{доб}$) — с изменением сопротивления $R_{доб}$ меняется жесткость механических характеристик двигателя (см. рис. 6.22, а).

Регулирование частоты вращения изменением магнитного потока возбуждения. Этот способ регулирования весьма эко-

номичен, так как изменение магнитного потока осуществляется реостатом в цепи обмотки возбуждения, ток в которой у рассматриваемых двигателей в несколько раз меньше тока в цепи обмотки якоря. Способ позволяет изменять частоту вращения в сторону увеличения от номинальной. При увеличении сопротивления реостата $r_{\text{рег}}$ (см. рис. 6.20) уменьшается ток в обмотке возбуждения I_b , а следовательно, и магнитный поток Φ , что вызывает возрастание частоты вращения якоря двигателя [см. (6.7)].

Зависимость частоты вращения двигателя от магнитного потока $n = f(\Phi)$ при неизменных значениях напряжения U и нагрузочного момента M_2 называется регулировочной характеристикой двигателя. Из регулировочной характеристики (рис. 6.24, график 1) следует, что при уменьшении магнитного потока Φ до значения Φ' частота вращения n увеличивается по гиперболическому закону [см. (6.7)] и при Φ' достигает максимального значения n_{max} . При дальнейшем уменьшении магнитного потока частота вращения уменьшается. Это объясняется тем, что уменьшение потока Φ сопровождается ростом тока в цепи якоря I_a (рис. 6.7, график 2). Такая зависимость следует из формулы $I_a = M/c_m \Phi$, полученной преобразованием (6.9). При $\Phi < \Phi'$ ток достигает значений, при которых падение напряжений в цепи якоря $I_a \sum r$ приближается к напряжению U . Из (6.7) следует, что с ростом тока I_a увеличивается второе слагаемое числителя этого выражения, а поэтому при значительном токе I_a уменьшение потока Φ сопровождается уменьшением частоты вращения n .

Максимальная частота вращения n_{max} при небольшой нагрузке на валу двигателя во много раз превосходит номинальную частоту вращения $n_{\text{ном}}$ и недопустима по условиям механической прочности двигателя. Поэтому при выборе реостата $r_{\text{рег}}$ необходимо следить, чтобы при полностью введенном его сопротивлении частота вращения двигателя не превышала допустимого значения. Например, для двигателей серии 2П допускается частота вращения не более $(2 \div 3)n_{\text{ном}}$. Необходимо следить за надежностью электрических соединений в цепи обмотки возбуждения двигателя, так как при разрыве этой цепи магнитный поток Φ уменьшается до значения потока остаточного магнетизма $\Phi_{\text{ост}}$ при котором в случае малых нагрузок на валу двигателя частота вращения может превышать максимальное значение.

Недостаток данного способа регулирования состоит в том, что при изменении потока Φ в значительной степени меняется жесткость механических характеристик двигателя (см. рис. 6.22, б).

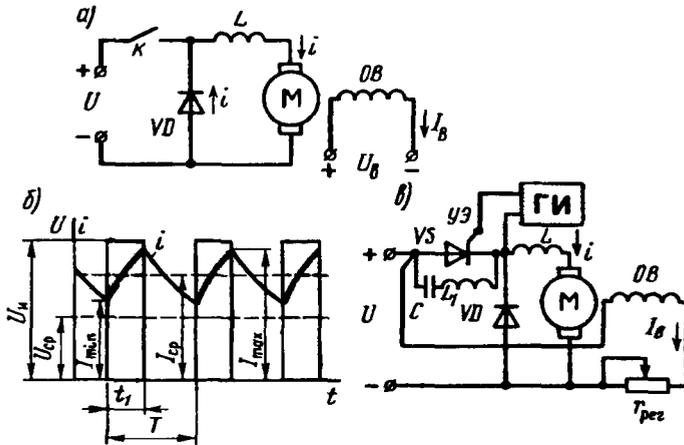


Рис. 6.25. Принципиальные схемы (а, в) и графики $u = f(t)$, $i = f(t)$ при импульсном регулировании частоты вращения двигателя (б)

Импульсное регулирование частоты вращения. Рассмотрим схему (рис. 6.25, а), поясняющую этот способ регулирования. Цепь обмотки якоря двигателя независимого возбуждения периодически подключается к источнику напряжения ключом K . При замыкании цепи якоря на время t_1 к обмотке якоря подводится напряжение $U = U_{\text{ном}}$, ток нарастает до значения I_{max} (рис. 6.25, б). При размыкании ключа ток уменьшается, достигая значения I_{min} , замыкаясь через диод VD . При следующем замыкании ключа K ток в якорю вновь достигает значения I_{max} и т. д. Таким образом, к цепи обмотки якоря подводятся импульсы напряжения, амплитудное значение которых равно напряжению U источника.

Среднее напряжение, прикладываемое к двигателю, B ,

$$U_{\text{cp}} = U t_1 / T = \gamma U, \quad (6.25)$$

где t_1 — длительность импульса напряжения; T — время между двумя следующими друг за другом импульсами напряжения (рис. 6.25, б); $\gamma = t_1 / T$ — коэффициент управления.

Ток в обмотке якоря определяется средним значением

$$I_{\text{cp}} = 0,5(I_{\text{max}} + I_{\text{min}}). \quad (6.26)$$

Частота вращения двигателя при импульсном регулировании

$$n = \frac{\gamma U - I_{\text{cp}} \sum r}{c_e \Phi}. \quad (6.27)$$

Импульсное регулирование обеспечивает изменение частоты вращения лишь в сторону уменьшения от номинальной. Для снижения пульсаций тока в цепь якоря включают дроссель L . Частота работы ключа составляет 200—400 Гц.

На рис. 6.25, в показана одна из возможных схем импульсного регулирования напряжения, где в качестве ключа используют тиристор VS . Включается тиристор (что соответствует замыканию ключа) подачей кратковременного импульса от генератора импульсов $ГИ$ на управляющий электрод $УЭ$. Цепь из дросселя L_1 и конденсатора C , шунтирующая тиристор, служит для выключения последнего в интервале между двумя управляющими импульсами. При включении тиристора конденсатор C перезаряжается по контуру $C—VS—L_1—C$ и к тиристорному прикладывается напряжение, обратное напряжению сети. Время открытого состояния тиристора (c) определяется параметрами цепи L_1C :

$$t = \pi\sqrt{L_1C}, \quad (6.28)$$

где L_1 — индуктивность дросселя, Гн; C — емкость конденсатора, Ф.

Среднее значение напряжения $U_{ср}$, подводимого к обмотке якоря, регулируется изменением частоты следования управляющих импульсов.

Частота вращения двигателей с постоянными магнитами (см. § 6.2) регулируется изменением напряжения на обмотке якоря (реостатом $R_{доб}$ или импульсным методом) только в сторону уменьшения от номинального значения.

Для изменения направления вращения якоря (реверса) двигателя необходимо изменить направление тока в обмотке якоря либо в обмотке возбуждения. При одновременном изменении направления тока в обеих обмотках якорь не изменяет направления вращения. В двигателях с постоянными магнитами реверс осуществляется изменением полярности клемм обмотки якоря.

■ 6.11. Двигатели последовательного возбуждения

В двигателях последовательного возбуждения обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря (рис. 6.26, а), при этом ток возбуждения равен току якоря ($I_b = I_a$), что придает двигателям особые свойства. При небольших нагрузках, когда $I_a < I_{ном}$ и магнитная система двигателя не насыщена ($\Phi \sim I_a$), электромагнитный момент пропорционален квадрату тока в обмотке якоря:

$$M = c_m \Phi I_a = c'_m I_a^2. \quad (6.29)$$

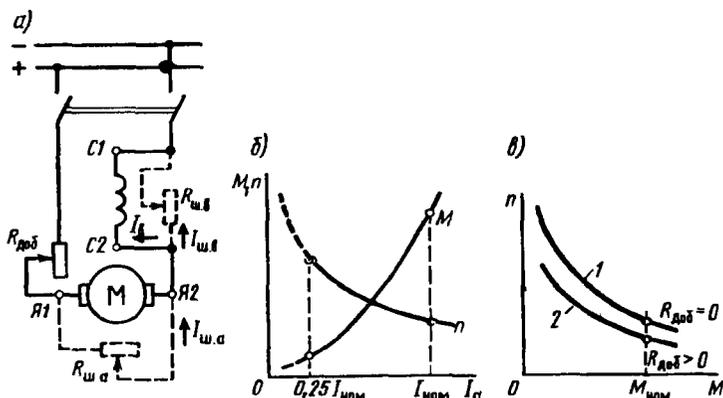


Рис. 6.26. Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения: а — принципиальная схема, б — рабочие характеристики, в — механические характеристики

С ростом нагрузки магнитная система двигателя насыщается и пропорциональность между током I_a и магнитным потоком Φ нарушается. При значительном насыщении магнитный поток Φ с ростом I_a практически не увеличивается. График зависимости $M = f(I_a)$ (рис. 6.26, б) в начальной части (когда магнитная система не насыщена) имеет форму параболы, затем при насыщении отклоняется от параболы и в области больших нагрузок переходит в прямую линию.

Зависимость частоты вращения n от тока якоря определяется из формулы (6.7) с учетом прямой пропорциональности $\Phi \sim I_a$ при нагрузке, меньше номинальной:

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{c_e \Phi} = \frac{U - I_a \sum r}{c_e' I_a} = \frac{U}{c_e' I_a} - \frac{\sum r}{c_e'} \quad (6.30)$$

где c_e' — постоянная, определяемая конструктивными параметрами двигателя.

Из (6.30) следует, что при небольших нагрузках график зависимости $n = f(I_a)$ представляет собой гиперболу, постепенно переходящую (при нагрузке, близкой к номинальной и превышающей ее) в прямую линию (рис. 6.26, в).

Недопустимо включать двигатели последовательного возбуждения в сеть в режиме холостого хода (без нагрузки на валу) или с нагрузкой менее 25% от номинальной, так как при малых нагрузках частота вращения якоря резко возрастает, достигая значений, при которых возможно механическое разрушение двигателя, поэтому в приводах с двигателями последовательного возбуждения недопустимо применять ременную передачу, при обрыве которой двигатель переходит в режим холостого хода. Исключение составляют двигатели последовательного возбуждения

мощностью до 100—200 Вт, которые могут работать в режиме холостого хода, так как их мощность механических и магнитных потерь при больших частотах вращения соизмерима с номинальной мощностью двигателя.

Механическая характеристика двигателя постоянного тока последовательного возбуждения $n = f(M)$ при неизменном напряжении питания U представлена на рис. 6.26, в (график 1). При введении в цепь якоря добавочного сопротивления $R_{доб}$ механическая характеристика становится более мягкой (рис. 6.26, в, график 2).

Способность двигателей последовательного возбуждения развивать большой электромагнитный момент [см. (6.29)] обеспечивает им хорошие пусковые свойства.

Регулирование частоты вращения двигателей последовательного возбуждения изменением напряжения U и включением добавочного сопротивления $R_{доб}$ выполняется так же, как и в двигателях независимого (параллельного) возбуждения (см. § 6.10).

Регулирование частоты вращения изменением магнитного потока возбуждения Φ осуществляется посредством реостата по одной из двух схем (рис. 6.26, а). В первой схеме реостат $R_{шв}$ включен параллельно обмотке возбуждения. В этом случае для увеличения частоты вращения необходимо уменьшить сопротивление этого реостата, что приведет к увеличению тока $I_{шв}$ через реостат $R_{шв}$ и к уменьшению тока I_b в обмотке возбуждения:

$$I_b = I_a - I_{шв} \quad (6.31)$$

Во второй схеме реостат $R_{шв}$ включен параллельно обмотке якоря. Для уменьшения частоты вращения двигателя необходимо уменьшить сопротивление реостата $R_{шв}$, что приведет к увеличению тока возбуждения за счет возросшего тока $I_{ша}$ в реостате $R_{шв}$, так как $I_b = I_a + I_{ша}$.

Недостатком обеих схем регулирования является их неэкономичность, обусловленная тем, что регулировочные реостаты включены в цепь рабочего тока и потери в них пропорциональны квадрату этого тока: $P_{шв} = (I_a - I_{шв})^2 R_{шв}$, $P_{ша} = (I_a - I_b)^2 R_{ша}$.

Обе схемы неэкономичны и не обеспечивают широкого диапазона регулирования. Для двигателей последовательного возбуждения малой мощности основной способ регулировки частоты вращения — изменение подводимого к двигателю напряжения. В двигателях мощностью до 200 Вт это делают посредством потенциометра, а при питании двигателя от индивидуального выпрямительного устройства — изменением напряжения переменного тока с помощью регулировочного автотрансформатора на входе выпрямителя аналогично двигателю независимого возбуждения (см. рис. 6.23, б).

Для изменения направления вращения якоря (реверса) двигателя последовательного возбуждения необходимо изменить направление тока в обмотке возбуждения OB , т. е. поменять местами провода, присоединяемые к клеммам $C1$ и $C2$ (рис. 6.26, а).

6.12. Универсальные коллекторные двигатели

Универсальный коллекторный двигатель работает как от сети постоянного тока, так и от сети переменного тока.

Возможность работы коллекторного двигателя последовательного возбуждения от сети переменного тока объясняется тем, что при изменении полярности подводимого напряжения изменяются направления токов в обмотке якоря и в обмотке возбуждения. При этом изменение полярности полюсов статора практически совпадает с изменением направления тока в обмотке якоря. В итоге направление электромагнитного вращающего момента не изменяется:

$$M = c_w I_a \Phi = c_w (-I_a)(-\Phi). \quad (6.32)$$

В качестве универсального используют двигатель последовательного возбуждения, у которого ток якоря является и током возбуждения, что обеспечивает почти одновременное изменение направления тока в обмотке якоря I_a и магнитного потока возбуждения Φ при переходе от положительного полупериода переменного напряжения сети к отрицательному.

Если двигатель подключить к сети синусоидального переменного тока, то ток якоря i_a и магнитный поток Φ будут изменяться по синусоидальному закону:

$$i = I_{\max} \sin \omega_1 t; \quad \Phi = \Phi_{\max} \sin(\omega_1 t - \delta), \quad (6.33)$$

где δ — угол сдвига фаз между током возбуждения и магнитным потоком, обусловленный магнитными потерями в двигателе.

Используя выражения (6.33), получим формулу электромагнитного момента коллекторного двигателя последовательного возбуждения, включенного в сеть синусоидального переменного тока, Н · м:

$$M_{\sim} = c_w I_{\max} \Phi_{\max} \sin \omega_1 t \sin(\omega_1 t - \delta) = 0,5 c_w I_{\max} \Phi_{\max} \cos \delta - 0,5 c_w I_{\max} \sin(2\omega_1 t - \delta). \quad (6.34)$$

Первая часть выражения (6.34) представляет собой постоянную составляющую электромагнитного момента $M_{\text{пост}}$ (рис. 6.27, а), а вторая часть — переменную составляющую этого момента $M_{\text{пер}}$ (рис. 6.27, б), изменяющуюся во времени с частотой, равной удвоенной частоте напряжения сети.

График результирующего момента $M_{\sim} = f(t)$ (рис. 6.26, в) получен сложением графиков, его составляющих:

$$M_{\sim} = M_{\text{пост}} + (-M_{\text{пер}}). \quad (6.35)$$

Таким образом, результирующий электромагнитный момент при работе двигателя от сети переменного тока пульсирует. Небольшие участки графика $M_{\sim} = f(t)$ с отрицательным тормозящим значением

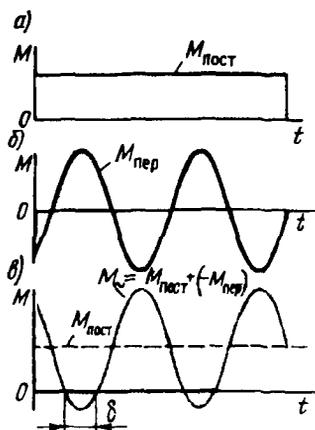


Рис. 6.27. Графики электромагнитного момента и его составляющих при работе коллекторного двигателя от сети переменного тока

момента обусловлены фазовым сдвигом δ между магнитным потоком и током в обмотке возбуждения. Чем меньше магнитные потери в магнитной системе двигателя, тем меньше отрицательный момент. Пульсации электромагнитного момента практически не нарушают работу двигателя. Объясняется это тем, что при значительной частоте пульсаций электромагнитного момента ($f_m = 2f_1$) и большом моменте инерции якоря вращение последнего оказывается равномерным.

При работе универсального коллекторного двигателя от сети переменного тока перемагничиванию подвергается вся магнитная система двигателя, включая станину и полюса. Это приводит к увеличению магнитных потерь, для уменьшения которых станину и полюса статора приходится делать шихтованными (см. рис. 6.5, б).

Кoeffициент полезного действия универсального двигателя при его работе от сети переменного тока более низкий, чем при его работе от сети постоянного тока. Другой недостаток универсального двигателя — тяжелые условия коммутации, вызывающие интенсивное искрение на коллекторе при включении двигателя в сеть переменного тока. Этот недостаток объясняется наличием трансформаторной связи между обмотками возбуждения и якоря, что ведет к наведению в коммутируемых секциях трансформаторной ЭДС, ухудшающей процесс коммутации в двигателе.

Универсальные коллекторные двигатели проектируют таким образом, чтобы получить примерно одинаковые частоты вращения при номинальной нагрузке как при питании от сети постоянного, так и переменного тока.

Достигается это тем, что обмотка возбуждения двигателя выполнена с ответвлениями: при работе двигателя от сети постоянного тока обмотка используется полностью, а при работе от сети переменного тока — частично (рис. 6.28, а). Однако при нагрузках, отличных от номинальной, характеристики двигателя при его работе от сети постоянного и переменного тока не совпадают из-за влияния индуктивных сопротивлений обмоток якоря и возбуждения при питании от сети переменного тока. На рис. 6.28, б приведены рабочие характеристики универсального коллекторного двигателя (пунктирными линиями при работе двигателя от сети переменного тока и сплошными — при

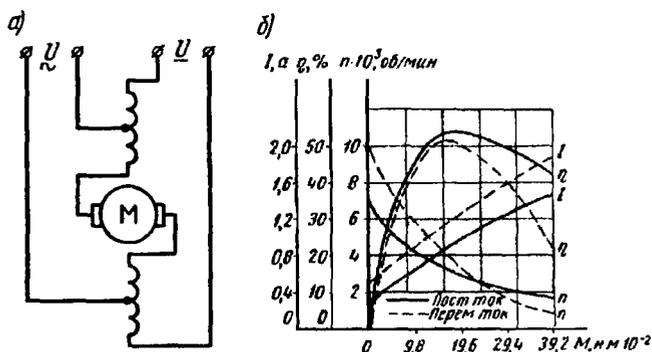


Рис. 6.28. Принципиальная схема (а) и рабочие характеристики (б) универсального коллекторного двигателя

работе от сети постоянного тока). При одинаковых нагрузках ток в обмотке якоря двигателя при его работе от сети переменного тока больше, чем при работе от сети постоянного тока, что объясняется наличием реактивной составляющей тока.

Частота вращения универсальных двигателей регулируется так же, как и в двигателях постоянного тока последовательного возбуждения (см. § 6.11).

Наличие щеточно-коллекторного узла является причиной ряда недостатков универсальных коллекторных двигателей, особенно при их работе на переменном токе (искрение на коллекторе, радиопомехи, повышенный шум, невысокая надежность). Однако эти двигатели по сравнению с асинхронными и синхронными при частоте питающего напряжения $f_1 = 50$ Гц позволяют получать частоту вращения до 10000 об/мин и более (наибольшая синхронная частота вращения при $f_1 = 50$ Гц равна 3000 об/мин).

Отечественной промышленностью изготавливаются несколько серий универсальных коллекторных двигателей, например УВ, УЛ, МУН.

■ 6.13. Бесконтактные двигатели постоянного тока

С целью улучшения свойств двигателей постоянного тока были созданы двигатели с бесконтактным коммутатором, называемые бесконтактными двигателями постоянного тока (БДПТ). Отличие БДПТ от коллекторных двигателей традиционной конструкции состоит в том, что у них щеточно-коллекторный узел заменен полупроводниковым коммутатором (инвертором), управляемым сигналами, поступающими с бесконтактного датчика положения ротора. Рабочая

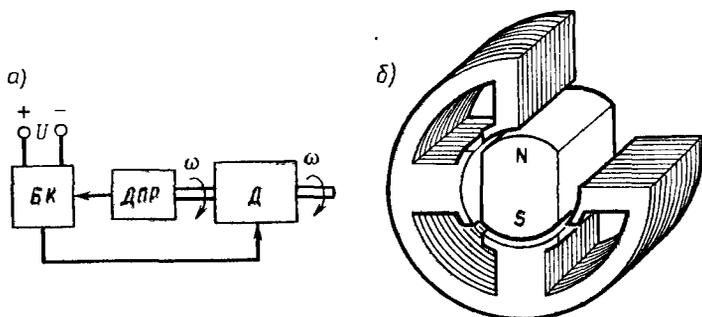


Рис. 6.29. Структурная схема (а) и магнитная система (б) четырех-фазного бесконтактного двигателя постоянного тока

обмотка двигателя — обмотка якоря — расположена на сердечнике статора, а постоянный магнит — на роторе.

Вал двигателя D (рис. 6.29, а) механически соединен с датчиком положения ротора ДПР, сигнал от которого поступает в коммутатор БК. Подключение секций обмотки якоря к источнику постоянного тока происходит через элементы блока коммутатора БК. Назначение ДПР — выдавать управляющий сигнал в блок коммутатора в соответствии с положением полюсов постоянного магнита относительно секций обмотки якоря.

В качестве датчиков положения ротора применяют различные чувствительные бесконтактные элементы с минимальными размерами и потребляемой мощностью и большой кратностью минимального и максимального сигналов, чтобы не вызывать нарушений в работе блока коммутатора. Чувствительные элементы ДПР должны надежно работать при внешних воздействиях (температура, влажность, вибрации и т. п.), на которые рассчитан двигатель. Такие свойства присущи ряду чувствительных элементов (датчиков): индуктивных, трансформаторных, магнитодиодов и т. п.

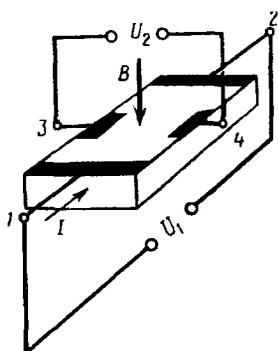


Рис. 6.30. Датчик ЭДС Холла

Наиболее целесообразно использовать датчики ЭДС Холла (рис. 6.30), представляющие собой тонкую полупроводниковую пластину с нанесенными на ней контактными площадками, к которым припаяны выводы 1—2, подключенные к источнику напряжения U_1 , и выводы 3—4, с которых снимают выходной сигнал U_2 . Если в цепи 1—2 проходит ток I , а датчик находится в магнитном поле, вектор индукции B которого перпендикулярен плоскости пластины датчика, то в датчике наводится ЭДС и на выводах 3—4 по-

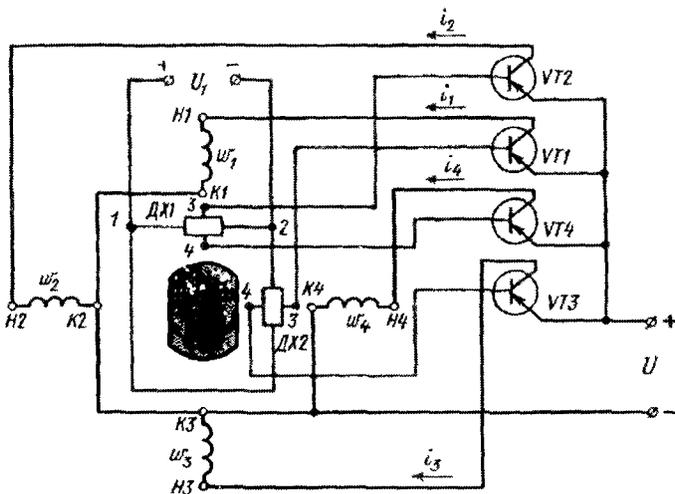


Рис. 6.31. Принципиальная схема бесконтактного двигателя постоянного тока с четырехфазной обмоткой якоря

является напряжение U_2 . Значение ЭДС зависит от тока I и магнитной индукции B , а полярность — от направления тока I в цепи $1-2$ и направления вектора магнитной индукции B .

Рассмотрим работу бесконтактного двигателя постоянного тока, для управления которым применяют датчики Холла и коммутатор, выполненный на транзисторах $VT1-VT4$ (рис. 6.31). Четыре обмотки фазы двигателя w_1-w_4 расположены на явно выраженных полюсах шихтованного сердечника якоря (см. рис. 6.29, б). Датчики Холла $ДХ1$ и $ДХ2$ установлены в пазах полюсных наконечников двух смежных полюсов. Силовые транзисторы $VT1-VT4$ работают в релейном (ключевом) режиме (рис. 6.31). Сигнал на открытие транзистора поступает от соответствующего датчика Холла (датчика положения ротора). Питание датчиков Холла (выводы $1-2$) осуществляется от источника напряжением U_1 .

Каждая обмотка фазы выполнена из двух катушек, расположенных на противоположащих полюсах сердечника статора и соединенных последовательно (рис. 6.32). Если по какой-либо из обмоток фазы статора проходит ток от начала $H1-H4$ к концу $K1-K4$, то полюса сердечника статора приобретают полярность соответственно S и N .

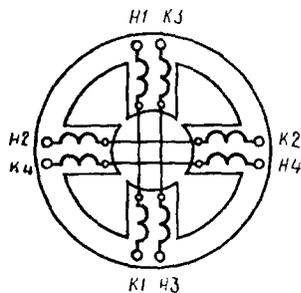


Рис. 6.32. Расположение обмоток фаз на полюсах статора

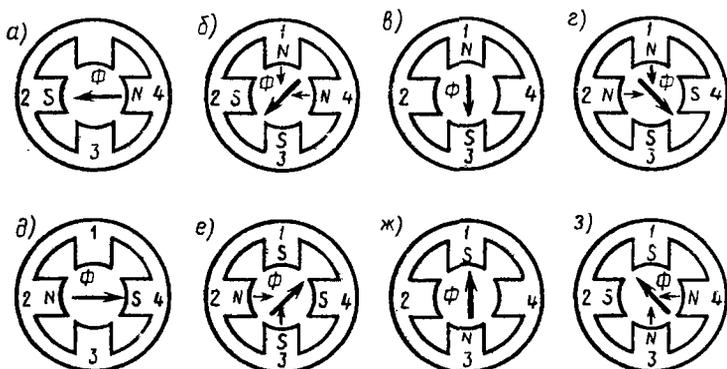


Рис. 6.33. Образование магнитного потока в четырехфазном БДПТ

При положении ротора, показанном на рис. 6.31, в зоне магнитного полюса N находится датчик $ДХ1$. При этом на выходе датчика появляется сигнал, при котором транзистор $VT2$ переходит в открытое состояние. В обмотке фазы статора ω_2 появляется ток i_2 , протекающий от $H2$ к $K2$. При этом полюса статора 2 и 4 приобретают полярность S и N (рис. 6.33, а). В результате взаимодействия магнитных полей статора и ротора (постоянного магнита) появляется электромагнитный момент M , вращающий ротор. После поворота ротора относительно оси полюсов статора 1—3 на некоторый угол α против часовой стрелки датчик $ДХ2$ окажется в зоне магнитного полюса ротора S , при этом по сигналу с датчика $ДХ2$ включается транзистор $VT3$. В фазной катушке w_3 возникает ток i_3 и полюса 3 и 1 приобретают полярность S и N . При этом магнитный поток статора Φ создается совместным действием МДС обмоток фаз w_2 и w_3 . Вектор этого потока повернут относительно оси 2—4 на угол 45° (рис. 6.33, б). Ротор, продолжая вращение, занимает положение по оси полюсов статора 2—4. При этом датчик $ДХ1$ попадает в межполюсное пространство ротора, а датчик $ДХ2$ останется в зоне полюса S ротора. В результате транзистор $VT2$ закрывается, транзистор $VT3$ останется открытым и магнитный поток Φ , создаваемый МДС обмотки фазы w_3 , поворачивается относительно оси полюсов 2—4 еще на 45° (рис. 6.33, в). После того, как ось вращающегося ротора пересечет ось полюсов статора 2—4, датчики $ДХ1$ и $ДХ2$ окажутся в зоне полюса ротора S , что приведет к включению транзисторов $VT3$ и $VT4$. Дальнейшую работу элементов схемы БДПТ (рис. 6.33) до завершения вектором потока Φ одного оборота проследим по табл. 6.3 и рис. 6.33, а—з.

На рис. 6.34 показано устройство рассмотренного БДПТ. Датчики Холла 3 размещены в специальных пазах полюсных наконечников 1 сердечника статора.

Таблица 6.3

Позиция на рис. 6.33	а	б	в	г	д	е	ж	з	а
Открыты транзисторы	VT2	VT2, VT3	VT3	VT3, VT4	VT4	VT4, VT1	VT1	VT1, VT2	VT2
Гок l проходит по фазным катушкам	w_2	w_2, w_3	w_3	w_3, w_4	w_4	w_1, w_4	w_1	w_1, w_2	w_2
Угол поворота вектора потока статора	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°

Постоянный магнит 2 не имеет центрального отверстия для посадки на вал, он закладывается в тонкостенную гильзу и закрывается привариваемыми фланцами двух полуосей. Такая конструкция ротора позволяет избежать выполнения центрального отверстия в постоянном магните, что часто является причиной брака (трещины, сколы и т. п.). Блок коммутатора БК расположен на панелях 5, отделен от двигателя перегородкой 4 и закрыт металлическим колпаком 6, через который выведены провода 7 для подключения двигателя в сети постоянного тока. Подобная конструкция применена в БДПТ полезной мощностью от 1 до 120 Вт.

Изменение направления вращения (реверс) двигателя осуществляется изменением полярности напряжения U_1 в токовой цепи датчиков Холла. Изменение полярности напряжения U на входе двигателя недопустимо, так как при этом прекращается работа блока коммутатора.

Коэффициент полезного действия БДПТ по сравнению с коллекторными двигателями постоянного тока (см. § 6.7) выше, что объясняется отсутствием щеточно-коллекторного узла, а значит, электрических потерь в щеточном контакте и механических потерь в коллекторе.

К достоинствам БДПТ относятся также высокая надежность и долговечность, что объясняется отсутствием у них щеточно-коллек-

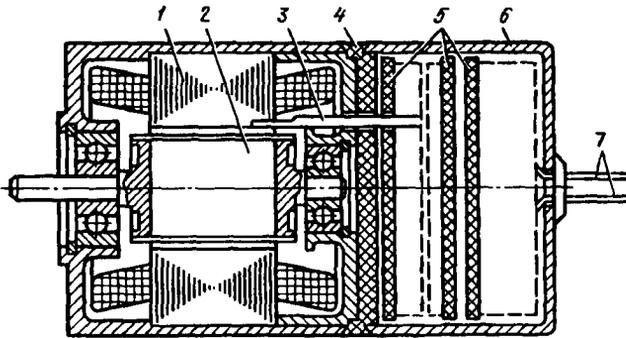


Рис. 6.34. Устройство БДПТ с четырехфазным статором

торного узла, т. е. их бесконтактностью. Двигатели могут работать в условиях широкого диапазона температур окружающей среды, в вакууме, в средах с большой влажностью и т. п., где применение коллекторных двигателей недопустимо из-за неработоспособности щеточно-коллекторного узла.

Недостаток БДПТ — повышенная стоимость, обусловленная наличием полупроводникового блока коммутатора, чувствительных элементов (датчиков ЭДС Холла) и постоянного магнита.

Контрольные вопросы

1. Какую роль выполняет коллектор в генераторе и двигателе постоянного тока?
2. Как влияет величина основного магнитного потока на частоту вращения и на электромагнитный момент двигателя постоянного тока?
3. Каковы способы регулирования частоты вращения в двигателях постоянного тока независимого и последовательного возбуждения?
4. Почему КПД универсального двигателя на переменном токе ниже чем на постоянном?
5. Каково назначение датчика положения ротора в БДПТ?

Глава 7

Двигатели с электромагнитной и электромеханической редукцией скорости

7.1. Двигатели с электромагнитной редукцией скорости

Для понижения частоты вращения вала двигателя и увеличения вращающего момента до требуемых значений между двигателем и рабочим механизмом устанавливают механический редуктор. Механический редуктор — система зубчатых или червячных передач. Применение редуктора в электроприводе понижает надежность последнего, увеличивает его массу, габаритные размеры, стоимость и создает дополнительный шум. Чтобы исключить из электропривода механический редуктор, необходим электродвигатель с малой частотой вращения выходного вала и достаточным вращающим моментом. Понижение частоты вращения двигателя традиционной конструкции за счет увеличения числа полюсов экономически невыгодно, так как при этом значительно увеличиваются масса и габаритные размеры двигателя.

За последние десятилетия получил развитие двигатель малой мощности с электромагнитной редукцией скорости, называемый *редукторным двигателем*. Рассмотрим работу редукторного синхронного двигателя реактивного типа. Его магнитная система состоит из шихтованных сердечников статора и ротора. В пазах статора расположена трехфазная или двухфазная обмотка, которая при включении в сеть создает вращающееся с частотой n_1 магнитное поле.

Обмотка статора выполнена путем намотки провода через спинку сердечника статора (рис. 7.1). Можно выполнять обмотку путем закладки ее в пазы статора. Число зубцов ротора и статора редукторного двигателя должно быть раз-

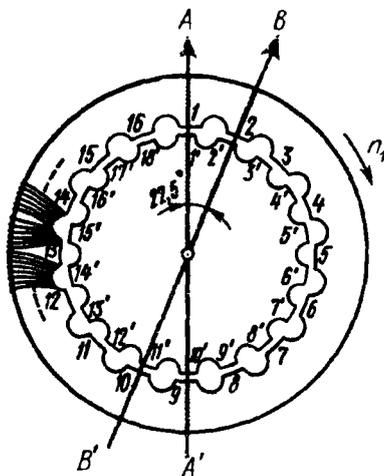


Рис. 7.1. Упрощенная модель двигателя с электромагнитной редукцией

ным. В рассматриваемом примере число полюсов $2p = 2$, число зубцов на роторе $Z_2 = 18$, на статоре $Z_1 = 16$, а разность этих чисел $Z_2 - Z_1 = 2$. Под действием вращающегося магнитного поля, созданного обмоткой статора, ротор стремится занять положение на линии оси магнитного потока AA' , так чтобы зубцы ротора I' и $10'$ заняли положение точно против зубцов статора I и 9 (при таком расположении зубцов сопротивление магнитному потоку минимально). Когда ось вращающегося магнитного потока займет положение по линии BB' , т. е. сместится на смежные зубцы статора, угол поворота оси потока составит угол $\alpha_1 = 360^\circ/16 = 22,5^\circ$, ротор также повернется и займет положение, при котором зубцы ротора 2 и $11'$ расположатся точно против зубцов статора $2'$ и 10 . При этом ротор повернется на угол α_2 , равный разности зубцовых делений статора и ротора:

$$\alpha_2 = 360^\circ/Z_1 - 360^\circ/Z_2. \quad (7.1)$$

Для рассматриваемого примера $\alpha_2 = 360^\circ/16 - 360^\circ/18 = 2,5^\circ$. Таким образом, частота вращения ротора n_2 меньше частоты вращения поля статора в $22,5/2,5 = 9$ раз. При повороте вращающегося поля статора на 360° (16 зубцовых делений статора) ротор повернется на $360^\circ/9 = 40^\circ$.

Частота вращения ротора синхронного редукторного двигателя, об/мин,

$$n_2 = [(Z_2 - Z_1)/Z_2](f_1 60/p), \quad (7.2)$$

где p — число пар полюсов обмотки статора.

В рассматриваемом примере при частоте тока в питающей сети $f_1 = 50$ Гц и $p = 1$

$$n_2 = [(18 - 16)/18](50 \cdot 60/1) = 333 \text{ об/мин.}$$

Обычно редукторные двигатели изготавливают на малые частоты вращения. Например, при $f_1 = 50$ Гц, $p = 1$, $Z_2 = 400$ и $Z_1 = 398$

$$n_2 = [(400 - 398)/400](50 \cdot 60/1) = 15 \text{ об/мин.}$$

Чем меньше относительная разность чисел зубцов ротора и статора $[(Z_2 - Z_1)/Z_2]$, тем меньшую долю составляет скорость вращения ротора по отношению к скорости поля статора. По условиям симметрии магнитной цепи двигателя разность $Z_2 - Z_1$ должна быть четным числом, а для двухполюсного двигателя ($2p = 2$) — не более двух.

■ 7.2. Двигатели с электромеханической редукцией скорости

Двигатели, составной частью которых является элемент редуктора (кинематическая пара с большим передаточным числом), называют двигателями с электромеханической редукцией скорости. К ним относятся двигатели с катящимся ротором и волновые двигатели.

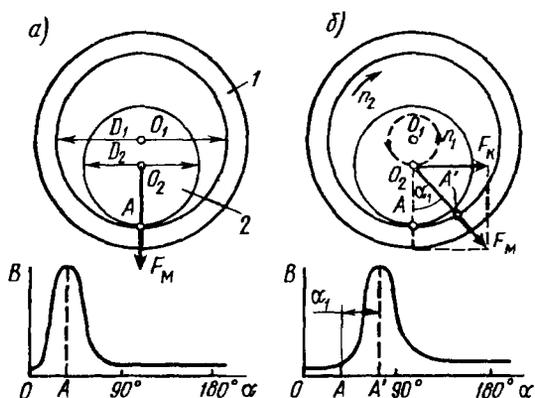


Рис. 7.2. К принципу действия ДКР

Двигатели с катящимся ротором (ДКР). Конструкция этих двигателей отличается от традиционной эксцентричным расположением ротора в расточке статора (т. е. центр окружности ротора не совпадает с центром расточки статора) и тем, что обмотками статора создается несимметричное вращающееся поле с резко выраженным максимумом магнитной индукции.

На рис. 7.2 показан поперечный разрез упрощенной модели ДКР. Внешнее кольцо 1 с центром O_1 и внутренним диаметром D_1 — статор двигателя, внутри которого расположен гладкий шихтованный ротор 2 цилиндрической формы из электротехнической стали с центром O_2 и внешним диаметром D_2 . Пусть статор создает несимметричное вращающееся с частотой n_1 магнитное поле, максимум которого в рассматриваемый момент времени совпадает с точкой A расточки статора (рис. 7.2, а). Ротор под действием силы магнитного притяжения F_M займет положение, при котором он будет касаться внутренней поверхности статора в этой же точке.

При повороте магнитного поля статора на угол α_1 против часовой стрелки на такой же угол сместится максимум этого поля, совмещившись с точкой A' (рис. 7.2, б). При этом сила магнитного притяжения ротора F_M , совпадающая по направлению с максимумом магнитной индукции, также повернется на угол α_1 . Под действием составляющей силы магнитного притяжения $F_K = F_M \sin \alpha_1$ ротор вращается по внутренней поверхности статора (точка A перемещается синхронно с полем). При этом ось (центр) ротора O_2 совершает круговое движение с частотой n_1 вокруг центра расточки статора O_1 против часовой стрелки и ротор вращается вокруг собственного центра O_2 в направлении часовой стрелки с частотой n_2 , во много раз меньшей частоты вращения поля статора n_1 . Если магнитное поле статора совершит

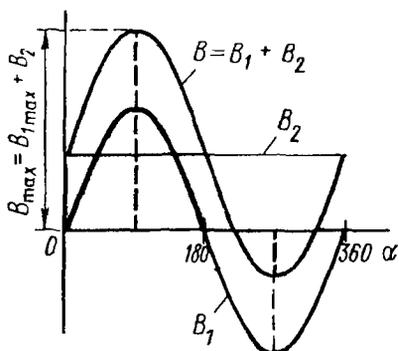


Рис. 7.3. Графики магнитных индукций при получении несимметричного вращающегося поля в ДКР

На основании (7.3) частота вращения ротора вокруг собственной оси

$$n_2 = n_1(D_1 - D_2)/D_2 = n_1 k_p, \quad (7.4)$$

где коэффициент редукции скорости

$$k_p = (D_1 - D_2)/D_2 = n_2 n_1. \quad (7.5)$$

Коэффициент редукции скорости в современных ДКР достигает весьма малых значений (10^{-4} и менее).

Рассмотрим способ получения несимметричного вращающегося магнитного поля. Существует несколько способов получения такого поля. Рассмотрим один из них, основанный на том, что симметричное вращающееся магнитное поле трехфазной или двухфазной обмотки статора с индукцией B_1 (рис. 7.3) накладывают на униполярное магнитное поле с индукцией B_2 , создаваемое постоянными магнитами или обмоткой, питаемой от сети постоянного тока. Полученное результирующее вращающееся магнитное поле является несимметричным с максимальным значением магнитной индукции

$$B_{\max} = B_{1\max} = B_2. \quad (7.6)$$

Двигатель с катящимся ротором и несимметричным вращающимся полем (рис. 7.4) состоит из стальной станины 1, в которую запрессованы сердечник статора 4 с трехфазной обмоткой 6, ферромагнитные тороиды 2 и катки 7. Между тороидами и сердечником статора помещены две соединенные последовательно тороидальные катушки 3, которые при подключении к источнику постоянного тока создают магнитный поток Φ_2 с индукцией B_2 . На валу 10 закреплены шихтованный сердечник 5 ротора без обмотки и два шихтованных пакета магнитопровода 8, через которые замыкается униполярный магнитный поток Φ_2 . На обеих сторонах вала 10 расположены катки ротора 9, которые при работе двигателя перекачиваются по каткам статора 7.

один оборот ($\alpha = 360^\circ$), то ротор, вращаясь против часовой стрелки по внутренней поверхности статора длиной πD_1 , повернется вокруг собственной оси O_2 по часовой стрелке на угол α_2 , равный разности длин окружности статора πD_1 и ротора πD_2 , деленной на радиус ротора $R_2 = D_2/2$:

$$\alpha_2 = 2\pi(D_1 - D_2)/D_2. \quad (7.3)$$

Из (7.3) следует, что если диаметры ротора D_2 и статора D_1 приблизительно равны, то угол α_2 поворота ротора очень мал.

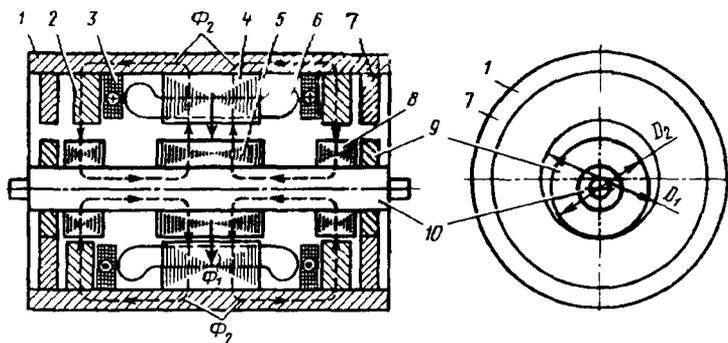


Рис. 7.4. Устройство ДКР

Через воздушный зазор между сердечниками статора и ротора проходят униполярный магнитный поток Φ_2 и вращающееся симметричное магнитное поле Φ_1 , создаваемое обмоткой статора. Оба потока, накладываясь друг на друга, образуют несимметричное вращающееся магнитное поле ДКР, обеспечивающее работу двигателя в соответствии с изложенным принципом действия (см. рис. 7.2) с той разницей, что сердечник ротора в рассматриваемом двигателе (рис. 7.4) не касается внутренней поверхности сердечника статора и между ними имеется воздушный зазор δ .

Процесс перекачивания происходит на катках статора и ротора, которые в некоторых случаях имеют зубчатую поверхность. Диаметры катков отличаются от диаметров статора и ротора, поэтому в (7.4) вместо диаметров статора D_1 и ротора D_2 принимают диаметры катков $D_{1к}$ и $D_{2к}$.

По исполнению рассмотренный ДКР — это синхронный двигатель с электромагнитным возбуждением. В случае зубчатых поверхностей катков статора и ротора коэффициент редукции по скорости определяется соотношением чисел зубцов статора Z_1 и ротора Z_2 :

$$k_p = (Z_1 - Z_2)/Z_2. \quad (7.7)$$

Двигатель может работать также и в асинхронном режиме. В этом случае между катками статора и ротора, которые должны быть гладкими, происходит проскальзывание, а частота вращения ротора двигателя $n_{2А} < n_{1кр}$.

Так как ротор ДКР расположен эксцентрично относительно рабочей точки статора, то для передачи вращающего момента от ротора к рабочему механизму применяют специальную механическую передачу. Обычно такую передачу выполняют с помощью карданного вала. На рис. 7.5 показана конструкция двухстороннего ДКР с механической передачей вращающегося момента посредством карданного вала. Два сердечника статора I с обмотками переменного тока 3 закреплены в

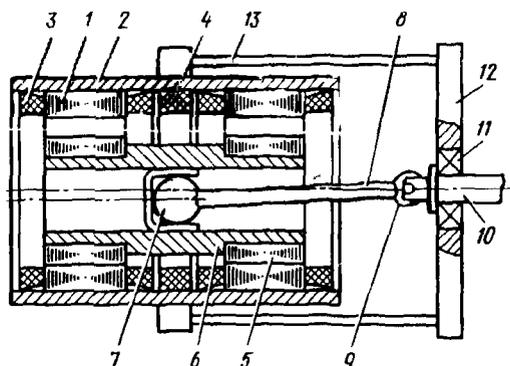


Рис. 7.5. Конструкция двухстаторного ДКР

станции 2. Между сердечниками расположена тороидальная обмотка подмагничивания 4. Сердечники ротора 5 закреплены на полый ферромагнитной втулке 6. В конструкции нет специальных катков, а сердечники ротора 5 катятся непосредственно по внутренней поверхности сердечников статоров 1. Наличие двух статоров способствует повышению вращающего момента двигателя.

Втулка 6 соединена с выходным валом 10 карданной передачей, состоящей из шарниров 7 и 9 и карданного вала 8. Выходной вал 10 вращается в подшипнике 11, размещенном во фланце 12. Этот фланец в совокупности с упругими стержнями 13 образует эластичную подвеску, которая гасит вибрации двигателя, не передавая их рабочему механизму.

Двигатели с катящимся ротором создают значительный пусковой момент при небольшом пусковом токе, а также имеют малое время разгона и торможения (при отключении обмотки статора от сети переменного тока за счет поля с $B_2 = \text{const}$ создается большой тормозной момент).

Недостатки ДКР: необходимость использования карданного вала; значительные вибрации и шумы, возникающие при движении ротора; нестабильная работа двигателя при ударных нагрузках; низкий КПД. Величина КПД зависит от номинальных значений мощности и частоты вращения — при $n_2 = 2 \div 10$ об/мин КПД не превышает 5%, а при $n_2 = 100 \div 200$ об/мин он достигает 30—40%.

Волновые двигатели. Двигатель представляет собой конструктивное объединение волновой передачи и электродвигателя. Статор волнового двигателя с трехфазной или двухфазной обмоткой создает вращающееся симметричное магнитное поле, вызывающее механические деформации гибкого элемента. Волновая передача обеспечивает получение значительного коэффициента редукции (до 100 и более) при небольших размерах и массе.

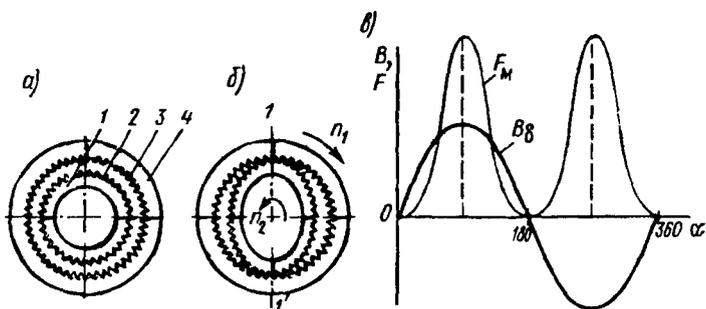


Рис. 7.6. К принципу действия волнового двигателя

Основные элементы волновой передачи — наружный (неподвижный) цилиндр 4 с зубчатой внутренней поверхностью 3 (рис. 7.6, а) и числом зубцов Z_1 , внутри которого расположен тонкостенный гибкий цилиндр 1 с зубчатой наружной поверхностью 2, имеющей число зубцов $Z_2 < Z_1$.

Если внутренний гибкий цилиндр деформировать в радиальном направлении по оси $I-I'$ (рис. 7.6, б) так, чтобы зубчатые поверхности наружного и внутреннего цилиндров пришли в зацепление, а затем вращать ось деформации $I-I'$ по часовой стрелке с частотой n_1 , то произойдет обкатывание тонкостенного внутреннего цилиндра 1 по внутренней поверхности наружного цилиндра 2. При этом тонкостенный внутренний цилиндр будет вращаться в направлении, противоположном вращению оси $I-I'$ с частотой, об/мин,

$$n_2 = n_1 k'_p, \quad (7.8)$$

где $k'_p = (Z_1 - Z_2)/Z_1$ — коэффициент редукиции скорости волнового двигателя.

В волновом двигателе наружный (неподвижный) цилиндр расположен на статоре, а гибкий (вращающийся) цилиндр — на роторе. Радиальные деформации внутреннего цилиндра создаются за счет сил магнитного притяжения этого цилиндра к полюсам статора. Вращение оси деформации $I-I'$ с внутреннего цилиндра обеспечивает вращающееся магнитное поле статора.

Рассмотрим упрощенную конструкцию волнового двигателя (рис. 7.7). В его алюминиевом корпусе 1 расположен шихтованный сердечник статора 2 с многофазной обмоткой 3, которая при включении в сеть переменного тока создает вращающееся магнитное поле с частотой вращения n_1 . В центральной части сердечника статора находится неподвижное кольцо 4 с зубцами Z_1 на внутренней поверхности. Ротор состоит из тонкостенного гибкого стакана б, на котором расположено гибкое кольцо 5 с зубцами Z_2 на внешней поверхности.

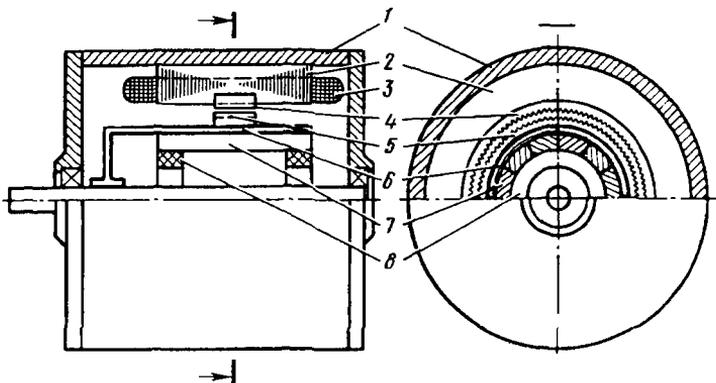


Рис. 7.7. Устройство волнового двигателя

Гибкое кольцо 5 и неподвижное кольцо 4 образуют волновую передачу. Вдоль внутренней поверхности полого стакана 6 ротора расположены подвижные относительно друг друга сектора 7 из ферромагнитного материала. Под действием сил магнитного притяжения сектора могут перемещаться в радиальном направлении, вызывая радиальные деформации гибкого кольца 5. К внутренней поверхности стакана ротора секторы прижимаются эластичными цилиндрическими кольцами 8.

При включении обмотки статора 3 в сеть в магнитной системе двигателя возникает вращающееся магнитное поле, которое воздействует на ферромагнитные секторы 7, создавая на них поочередно силы магнитного притяжения. В итоге создается волна деформации, вращающаяся синхронно с вращающимся магнитным полем с частотой n_1 , вызывая деформацию гибких колец 8 и 5, как это показано на рис. 7.6, б. При этом ротор двигателя вращается в направлении, противоположном вращению поля статора с частотой n_2 [см. (7.8)]. Так как вращающееся магнитное поле статора взаимодействует с невозбужденным ротором, то рассмотренный волновой двигатель является синхронным двигателем реактивного типа.

Если обмотка статора двухполюсная и магнитная индукция вращающегося поля B_8 распределена по синусоидальному закону (рис. 7.6, в), то сила магнитного притяжения ферромагнитных секторов 7 к сердечнику статора 2 (см. рис. 7.7) распределяется по периметру ротора в соответствии с графиком Φ , показанным на рис. 7.6, в. Максимальные значения этой силы действуют на диаметрально расположенные участки ротора, вызывая деформацию гибкого кольца (рис. 7.6, б).

В отличие от двигателя с катящимся ротором, который может работать только с двухполюсной обмоткой статора, волновой двигатель

может работать с многополюсной обмоткой статора. При этом у элементов волновой передачи число волн деформации равно числу полюсов вращающегося поля статора $2p$. Ротор волнового двигателя в процессе работы остается сбалансированным, так как волны деформации располагаются симметрично относительно оси вращения ротора. Поэтому в отличие от ДКР работа волнового двигателя не сопровождается значительными вибрациями и шумами. Перспективно применять волновые двигатели для привода устройств автоматики из-за их малоинерционности и высокой точности заданных перемещений.

В заключение отметим, что применение волновых двигателей ограничивается некоторой сложностью их конструкции, обусловленной трудностью изготовления гибкого элемента ротора.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы редукторного двигателя.
2. Как получают несимметричное (униполярное) вращающееся магнитное поле в ДКР?
3. От чего зависит число волн деформации гибкого элемента в волновом двигателе?

Раздел 3

Электромашинные элементы автоматики

Электромашинные элементы автоматики — это электрические машины малой мощности (микромашины), применяемые в системах и устройствах автоматики и вычислительной техники в качестве функциональных элементов. Все электромашинные элементы автоматики разделяются на три группы: исполнительные двигатели, электромашинные усилители и информационные машины. Исполнительные двигатели осуществляют преобразование электрического сигнала в механическое перемещение, они могут быть асинхронными, постоянного тока и шаговыми. Электромашинные усилители служат для усиления мощности электрических сигналов. Информационные машины включают в себя тахогенераторы, сельсины, магнесины и вращающиеся трансформаторы. Эти машины служат для преобразования механических величин (угла поворота, частоты вращения или ускорения) в электрический сигнал или для передачи механического перемещения на расстояние. Классификация электромашинных элементов автоматики приведена на рис. В.2.

Глава 8

Исполнительные двигатели

■ 8.1. Назначение исполнительных двигателей и предъявляемые к ним требования

Исполнительные двигатели предназначены для преобразования управляющего электрического сигнала в угловое механическое перемещение вала в системах автоматики. Такие двигатели работают в условиях частых пусков и остановов, так как сигнал управления систематически меняется в соответствии с программой регулирования. Исполнительные двигатели иногда называют *управляемыми*.

В системах автоматики применяют исполнительные двигатели трех видов — постоянного тока, асинхронные и шаговые. По характеру работы исполнительные двигатели делятся на двигатели непрерывного и дискретного (прерывистого) действия.

В исполнительных двигателях *непрерывного действия* угловое перемещение (вращение) вала происходит в течение всего времени действия управляющего сигнала, при этом частота вращения вала зависит от параметров этого сигнала (амплитуды, фазы). К исполнительным двигателям непрерывного действия относятся двигатели постоянного тока и асинхронные.

В исполнительных двигателях *дискретного действия* угловое перемещение вала происходит скачками, т. е. при поступлении управляющего сигнала на обмотку двигателя вал поворачивается на определенный угол независимо от продолжительности действия этого сигнала. К исполнительным двигателям дискретного действия относятся шаговые двигатели.

Специфические условия работы исполнительных двигателей определяют предъявляемые к ним требования: отсутствие самохода (при прекращении управляющего сигнала ротор двигателя должен остановиться); минимальная криволинейность механических и регулировочных характеристик, что обеспечит устойчивую работу двигателя в широком диапазоне частот вращения; надежность и экономичность способов управления; быстроедействие (малоинерционность), т. е. минимальное время разгона ротора до установившейся частоты вращения; минимальное напряжение трогания — минимальное значение управляющего сигнала, вызывающее вращение ротора двигателя.

При решении вопроса о целесообразности применения двигателя в качестве исполнительного исходят из того, в какой мере он удовле-

творяет перечисленным требованиям. Кроме того, исполнительные двигатели должны удовлетворять общим требованиям, предъявляемым к электрическим машинам общепромышленного назначения: минимальные габаритные размеры и масса, высокие эксплуатационные показатели (надежность, КПД, коэффициент мощности), удобство и безопасность обслуживания, соответствие климатическим условиям и т. п.

Специфика требований, предъявляемых к исполнительным двигателям, привела к необходимости создания специальных конструкций этих двигателей (двигатели сквозной конструкции, с полым или дисковым якорем).

Для удобства сравнения свойств исполнительных двигателей, различающихся мощностью, принципом действия и способом управления, используют относительные значения основных параметров: момента $m = M/M_0$, частоты вращения $v = n/n_0$, напряжения управляющего сигнала $\alpha = U_v/U_0$, и механической мощности $p_2 = mv$. Здесь M_0 , n_0 и U_0 — величина момента, частоты вращения и напряжения, принятые при расчете относительных величин за базовые.

При оценке эксплуатационных свойств исполнительных двигателей непрерывного действия пользуются следующими характеристиками.

Механические характеристики — зависимость электромагнитного момента от частоты вращения $m = f(v)$ при напряжении управления (коэффициенте сигнала) $\alpha = \text{const}$; обычно эти характеристики строят для ряда значений коэффициента сигнала $\alpha = 0,25; 0,50; 0,75$ и $1,0$, получая таким образом семейство механических характеристик, построенных в одних осях координат.

Регулировочные характеристики — зависимость частоты вращения от напряжения управления (коэффициента сигнала) $v = f(\alpha)$ при электромагнитном моменте $m = \text{const}$; построив эти характеристики для ряда значений момента $m = 0,25; 0,50; 0,75$ и $1,0$, получают семейство регулировочных характеристик.

Зависимость полной механической мощности от частоты вращения $p_2 = f(v)$ при $\alpha = \text{const}$; построив эти характеристики для значений коэффициента сигнала $\alpha = 0,25; 0,50; 0,75$ и $1,0$, получают семейство характеристик механической мощности.

■ 8.2. Исполнительные двигатели постоянного тока

В качестве исполнительных двигателей постоянного тока применяют двигатели с электромагнитным независимым возбуждением или с возбуждением постоянными магнитами. Наличие щеточно-коллекторного узла усложняет эксплуатацию исполнительных двига-

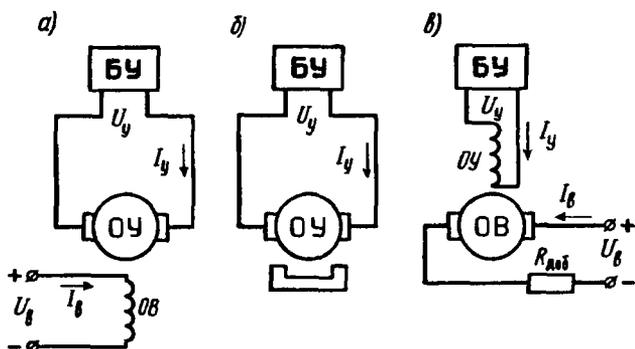


Рис. 8.1. Принципиальные схемы исполнительных двигателей постоянного тока с якорным (а, б) и полюсным (в) управлением

телей и делает невозможным их применение во взрывоопасных и пожароопасных средах. Механическое трение щеток о коллектор усложняет управление такими двигателями.

Однако исполнительные двигатели постоянного тока имеют ряд достоинств: их механические и регулировочные характеристики практически прямолинейны, способы управления просты, габаритные размеры и масса меньше, чем у асинхронных двигателей.

В исполнительных двигателях постоянного тока с электромагнитным возбуждением применяют якорное и полюсное управление. В двигателях с возбуждением постоянными магнитами — только якорное управление.

При *якорном управлении* исполнительного двигателя с электромагнитным возбуждением (рис. 8.1, а) обмотка полюсов является обмоткой возбуждения OB , а обмотка якоря — обмоткой управления OU . Во время работы исполнительного двигателя к обмотке возбуждения подводится неизменное напряжение постоянного тока U_b , на обмотку управления подается управляющий сигнал (напряжение управления) U_y от блока управления $БУ$, являющегося элементом автоматической системы. Напряжение U_y подается в моменты времени, определяемые автоматической системой управления, когда требуется включить исполнительного двигателя. В двигателях с возбуждением постоянными магнитами обмотка возбуждения отсутствует и к двигателю подводят лишь управляющий сигнал (рис. 8.1, б).

При *полюсном управлении* обмотка якоря является обмоткой возбуждения OB , а обмотка полюсов — обмоткой управления OU (рис. 8.1, в). Для ограничения тока возбуждения I_b в неподвижном якоре, когда противо-ЭДС $E_b = 0$ (см. § 6.3), и в обмотке якоря проходит ток короткого замыкания $I_b = I_k = U_b/r_b$; при мощности двигателя более 10 Вт в цепь якоря последовательно включают резистор сопротивлением $R_{доб}$.

Изменение направления вращения (реверс) исполнительного двигателя постоянного тока осуществляется изменением полярности управляющего сигнала.

При расчете относительных параметров исполнительных двигателей постоянного тока (см. § 8.1) за базовую величину при определении относительного электромагнитного момента принимают начальный пусковой момент $M_{п.ном.}$ при номинальных напряжениях на обмотках OB и OY : $m = M/M_{п.ном.}$. Уровень управляющего сигнала оценивается коэффициентом сигнала

$$\alpha = U_y / U_v. \quad (8.1)$$

Исполнительный двигатель с якорным управлением. При якорном управлении самоход в двигателе не возникает, так как при снятии управляющего сигнала $U_y = 0$, $I_y = 0$, электромагнитный момент двигателя $M = c_m \Phi_v I_y = 0$.

Уравнение механической характеристики исполнительного двигателя при якорном управлении

$$m = \alpha - v, \quad (8.2)$$

где $m = M/M_{п.ном.}$ — относительный момент двигателя; $M_{п.ном.}$ — пусковой момент при $\alpha = 1$; $v = n/n_0$ — относительная частота вращения двигателя; n_0 — частота вращения двигателя при $M = 0$.

Из (8.2) следует, что механическая характеристика исполнительного двигателя постоянного тока $m = f(v)$ при $\alpha = \text{const}$ прямолинейна. На рис. 8.2, а показаны механические характеристики двигателя при якорном управлении, построенные для различных значений коэффициента сигнала α . Анализ характеристик показывает, что механические характеристики прямолинейны и параллельны: двигатель развивает максимальный вращающий момент при пуске $v = 0$; относительный пусковой момент равен коэффициенту сигнала ($m_{п.} = \alpha$). Из (8.2) получим уравнение регулировочной характеристики двигателя

$$v = \alpha - m, \quad (8.3)$$

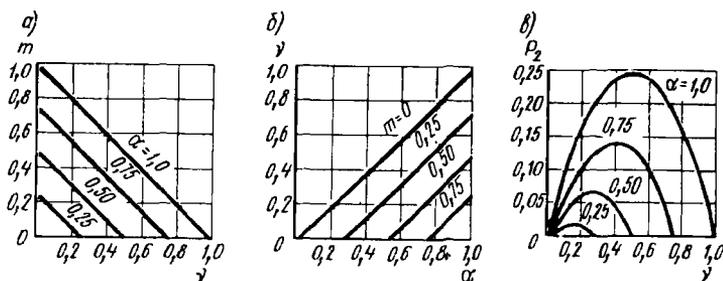


Рис. 8.2. Характеристики исполнительного двигателя с якорным управлением: механическая (а), регулировочная (б), механической мощности (в)

откуда следует, что регулировочная характеристика двигателя с якорным управлением $v = f(\alpha)$ при $m = \text{const}$ прямолинейна.

Анализ этих характеристик (рис. 8.2, б), построенных для различных значений m , показывает, что частота вращения двигателя прямо пропорциональна коэффициенту сигнала α во всем диапазоне нагрузок двигателя; наибольшая частота вращения двигателя соответствует $\alpha = 1$.

Механическая мощность исполнительного двигателя в относительных единицах $p_2 = mv$. Используя (8.2), получим уравнение характеристики механической мощности

$$p_2 = \alpha v - v^2. \quad (8.4)$$

Из (8.4) следует, что характеристика механической мощности исполнительного двигателя с якорным управлением $p_2 = f(v)$ при $\alpha = \text{const}$ — квадратичная функция частоты вращения v . Анализ этих характеристик, построенных при различных α (рис. 8.2, в), показывает, что снижение коэффициента сигнала α резко уменьшает механическую (а следовательно, и полезную) мощность двигателя. Это объясняется тем, что максимальное значение механической мощности $p_{2\text{max}}$ при заданном α пропорционально квадрату коэффициента сигнала

$$p_{2\text{max}} = \alpha^2/4. \quad (8.5)$$

Следовательно, при работе исполнительного двигателя с малыми значениями коэффициента сигнала α плохо используется механическая мощность двигателя. Максимальная механическая мощность $p_{2\text{max}}$ будет при относительной частоте вращения $v' = 0,5\alpha$.

Мощность возбуждения исполнительного двигателя с якорным управлением равна электрическим потерям в обмотке возбуждения (обмотке полюсов), Вт:

$$p_{\text{в}} = I_{\text{в}}^2 r_{\text{в}}. \quad (8.6)$$

Так как ток возбуждения $I_{\text{в}}$ двигателей постоянного тока независимого возбуждения в несколько раз меньше тока якоря в номинальном режиме, то мощность возбуждения $p_{\text{в}} \sim I_{\text{в}}^2$ составляет небольшую величину. Мощность возбуждения не зависит от нагрузки двигателя, а в двигателях с возбуждением от постоянных магнитов эта мощность равна нулю.

Мощность управления для двигателей с якорным управлением, Вт,

$$P_{\text{у}} = U_{\text{у}} I_{\text{у}} = P_2 + I_{\text{у}}^2 r_{\text{у}} + P_{\text{м}} + P_{\text{мех}}, \quad (8.7)$$

т. е. она равна сумме полезной механической мощности P_2 и сумме электрических потерь в обмотке управления (якоря) $I_{\text{у}}^2 r_{\text{у}}$, магнитных потерь в сердечнике якоря $P_{\text{м}}$ и механических потерь $P_{\text{мех}}$. Эту мощность представим равной разности всей потребляемой двигателем мощности P_1 и потерь на возбуждение двигателя, Вт:

$$P_y = P_1 - P_6. \quad (8.8)$$

Мощность возбуждения составляет от 5% (в двигателях мощностью 250 Вт) до 30% (в двигателях мощностью до 7 Вт). Таким образом, мощность управления исполнительных двигателей с якорным управлением равна соответственно 95—70% от всей подводимой к двигателю мощности. Это недостаток якорного управления, так как необходимо применять блоки управления значительной мощности.

Исполнительный двигатель с полюсным управлением. Существенный недостаток полюсного управления — возможность самохода исполнительного двигателя. Это объясняется тем, что после прекращения сигнала управления двигатель остается возбужденным за счет небольшого магнитного потока остаточного магнетизма $\Phi_{ост}$ и на якорь продолжает действовать небольшой электромагнитный момент, $H \cdot m$:

$$M_{ост} = c_m \Phi_{ост} I_{в}, \quad (8.9)$$

который при небольшой нагрузке на валу двигателя может вызвать самопроизвольное вращение якоря при $\alpha = 0$. Для устранения самохода двигатель должен иметь на валу постоянно действующую механическую нагрузку $M_H > M_{ост}$.

Уравнение механической характеристики двигателя с полюсным управлением

$$m = \alpha(1 - \alpha v). \quad (8.10)$$

Из (8.10) следует, что механические характеристики двигателя с полюсным управлением прямолинейны, но в отличие от механических характеристик двигателя с якорным управлением они не параллельны друг другу (рис. 8.3, а), т. е. при разных коэффициентах сигнала жесткость характеристик неодинакова (с уменьшением α жесткость характеристик возрастает).

При полюсном управлении частота вращения идеального холостого хода обратно пропорциональна коэффициенту сигнала:

$$v_0 = 1/\alpha, \quad (8.11)$$

так как частота вращения обратно пропорциональна магнитному потоку.

Для двигателей малой мощности такое влияние α на частоту вращения не опасно, так как механическая нагрузка на якорь таких двигателей, вызванная трением в подшипниках и вращающегося якоря о воздух, достаточна для ограничения частоты вращения двигателя. Но в двигателях мощностью в несколько десятков и более ватт при отсутствии нагрузки на валу и малых значениях сигнала управления, а тем более после прекращения подачи сигнала частота вращения ротора может достигнуть опасного значения для механической прочности двигателя. Для предотвращения этого необходимо

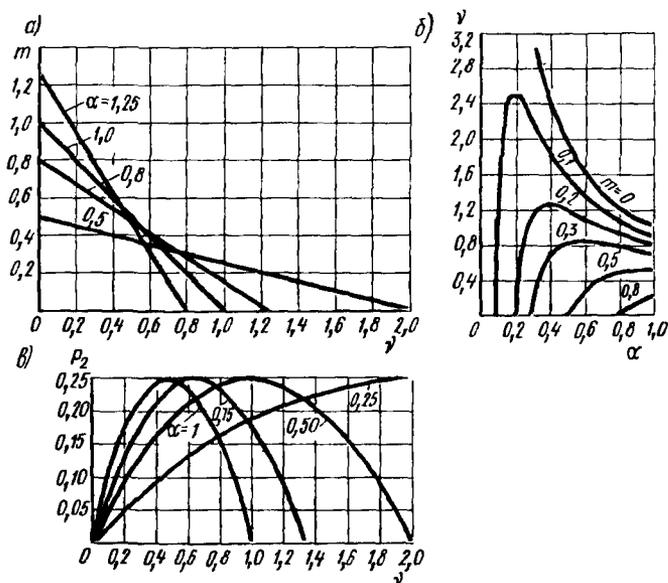


Рис. 8.3. Характеристики исполнительного двигателя с полюсным управлением: механическая (а), регулировочная (б), механической мощности (в)

создать на валу двигателя постоянно действующий момент нагрузки такой величины, чтобы частота вращения якоря не достигла опасного значения.

Уравнение регулировочной характеристики исполнительного двигателя с полюсным управлением $v = f(\alpha)$ имеет вид

$$v = (\alpha - m) / \alpha^2, \quad (8.12)$$

что свидетельствует о криволинейности регулировочных характеристик исполнительных двигателей с полюсным управлением (рис. 8.3, б). Это обстоятельство — серьезный недостаток полюсного управления, тем более что при малых нагрузочных моментах ($m \leq 0,5$) регулировочные характеристики неоднозначны, т. е. при двух различных значениях коэффициента сигнала можно получить одинаковую частоту вращения. Этот недостаток ограничивает применение полюсного управления только для привода устройств, которые создают момент сопротивления на валу двигателя не меньше $0,5M_{II}$.

Используя (8.10), определим механическую мощность

$$P_2 = \alpha v - \alpha^2 v^2. \quad (8.13)$$

Из характеристик механической мощности $P_2 = f(v)$ (рис. 8.3, в) видно, что максимум механической мощности соответствует частоте

вращения $v' = 1/(2\alpha)$. Подставляя $v = 1/(2\alpha)$ в (8.13), получим выражение максимальной механической мощности

$$P_{2\max} = \alpha[1/(2\alpha)] - \alpha^2[1/(4\alpha^4)] = 1/4. \quad (8.14)$$

Из (8.14) следует, что *максимальная механическая мощность при полюсном управлении не зависит от коэффициента сигнала α* . Это достоинство полюсного управления, позволяющее при небольших значениях α получать значительную механическую мощность.

Мощность возбуждения при полюсном управлении равна сумме механической мощности, электрических потерь в цепи якоря, магнитных и механических потерь исполнительного двигателя:

$$P_{\text{в}} = U_{\text{в}} I_{\text{в}} = P_2 + I_{\text{в}}^2(r_{\text{в}} + R_{\text{доб}}) + P_{\text{м}} + P_{\text{мех}}. \quad (8.15)$$

Эта мощность составляет до 70—90% всей потребляемой двигателем мощности. Остальные 30—10% от всей потребляемой двигателем мощности P_1 составляет мощность управления $P_{\text{у}}$.

Небольшая величина мощности управления является достоинством полюсного управления исполнительными двигателями, так как позволяет в значительной степени уменьшить мощность усилителя в блоке управления.

■ 8.3. Устройство исполнительных двигателей постоянного тока

Одно из основных требований к исполнительным двигателям — быстроедействие (малоинерционность). При подаче управляющего сигнала на соответствующую обмотку исполнительного двигателя якорь начинает вращение и, разгоняясь, через некоторое время достигает установившейся частоты вращения. Время разгона якоря двигателя определяется электромеханическими процессами, обусловленными переходным процессом. Для количественной оценки быстрогодействия исполнительного двигателя используют *электромеханическую постоянную времени*, представляющую собой время (с), за которое якорь (ротор) разгоняется до частоты вращения, равной $0,633\omega_0$, где ω_0 — угловая скорость якоря в режиме холостого хода:

$$\omega_0 = 2\pi n_0 / 60 \approx 0,105 n_0. \quad (8.16)$$

Электромеханическая постоянная времени прямо пропорциональна моменту инерции якоря

$$T_{\text{эм}} \approx 0,105 J_2 n_0 / M_{\text{п}}, \quad (8.17)$$

где $M_{\text{п}}$ — начальный пусковой момент двигателя, Н · м. Момент инерции якоря, Н · мс²,

$$J_2 = G_2 D_2^2 / 4g, \quad (8.18)$$

где G_2 — сила тяжести якоря, H ; D_2 — диаметр якоря, m ; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение силы тяжести.

Используя (8.18), электромеханическая постоянная времени, c ,

$$T_{эм} = 26 \cdot 10^{-3} G_2 D_2^2 n_0 / g M_n. \quad (8.19)$$

Следовательно, повышению быстродействия (уменьшению $T_{эм}$) исполнительного двигателя способствуют: увеличение пускового момента, уменьшение силы тяжести якоря (ротора) и его наружного диаметра, уменьшение частоты вращения холостого хода.

При уменьшении наружного диаметра якоря (ротора) увеличивают его длину, чтобы обеспечить требуемую мощность двигателя.

Быстродействие исполнительного двигателя зависит также от способа управления. Для двигателей постоянного тока с якорным управлением электромеханическая постоянная времени определяется по (8.19), т. е. $T_{эм.я} = T_{эм}$, а при полюсном управлении $T_{эм.п} = T_{эм} / \alpha^2$, т. е. она в значительной степени зависит от коэффициента сигнала α .

Если к исполнительному двигателю постоянного тока не предъявляют особых требований по быстродействию, то в качестве такого двигателя применяют двигатель постоянного тока с обычной конструкцией якоря. Частые пуски, остановки и реверсы, сопровождающие работу исполнительного двигателя, вызывают интенсивное перемагничивание магнитной системы двигателя, включая станину и сердечники полюсов. Поэтому сердечник якоря и станину с полюсами делают шихтованными (см. рис. 6.5, б). Примеры таких конструкций — исполнительные двигатели серии СЛ (см. рис. 6.10) или исполнительные двигатели с постоянными магнитами, например серии ДПМ.

Если же к исполнительному двигателю предъявляются требования повышенного быстродействия, то используют малоинерционные двигатели специальной конструкции, из которых наибольшее применение получили малоинерционные двигатели постоянного тока с полым, дисковым или с гладким (беспазовым) якорем.

Двигатель постоянного тока с полым якорем. Для уменьшения силы тяжести вращающейся части обмотка якоря двигателя выполнена в виде полого пластмассового стакана. В процессе изготовления обмотку якоря укладывают на цилиндрический каркас, соединяют с коллектором и заливают эпоксидной смолой. В итоге получается механически прочная конструкция в виде полого стакана, одной стороной закрепленного на валу (рис. 8.4, а). Индуктивность такой обмотки намного меньше, чем у обмотки якоря обычной конструкции, уложенной в пазах ферромагнитного сердечника якоря. Это существенно улучшает коммутацию, и работа двигателя при пусках и реверсах не сопровождается искрением на коллекторе, что в 2—3 раза увеличи-

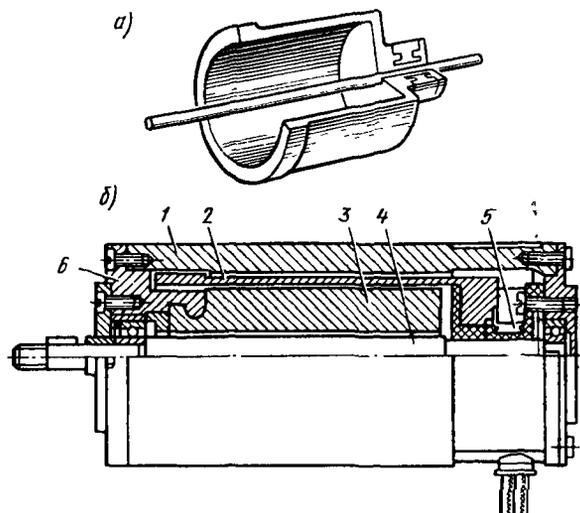


Рис. 8.4. Исполнительный двигатель постоянного тока с полым якорем:
а — полый якорь, *б* — устройство (продольный разрез) двигателя серии ДГР

вадет срок службы коллектора и щеток, упрощает уход за двигателем и повышает стабильность его характеристик.

Отечественной промышленностью изготавливается серия двигателей с полым якорем ДГР. Станина *1* такого двигателя (рис. 8.4, *б*) изготовлена из магнито-мягкой стали. Внутри полого якоря *2* расположен постоянный магнит *3* цилиндрической формы, осуществляющий возбуждение двигателя. Через центральное отверстие в магните проходит вал *4*, изготовленный из нержавеющей, не обладающей ферромагнитными свойствами стали. Постоянный магнит жестко прикреплен к подшипниковому щиту *б*. Подшипниковый щит выполнен из алюминиевого сплава, его центральное отверстие для установки подшипника армировано стальной втулкой. Коллектор *5* имеет пластмассовую основу (см. рис. 6.8).

Двигатели с полым якорем имеют между постоянным магнитом и станиной большой немагнитный промежуток, который складывается из двух воздушных зазоров и толщины стакана якоря. Из-за наличия этого промежутка требуется значительное увеличение МДС возбуждения. В двигателях с постоянными магнитами для этого необходимо увеличение размеров постоянного магнита, а в двигателях с электромагнитным возбуждением — увеличение габаритных размеров обмотки возбуждения, следствием чего является рост потерь на возбуждение. Однако КПД двигателей постоянного тока с полым якорем больше, чем двигателей с зубцовым якорем, что объясняется меньшими механическими потерями (полый якорь во много раз легче зуб-

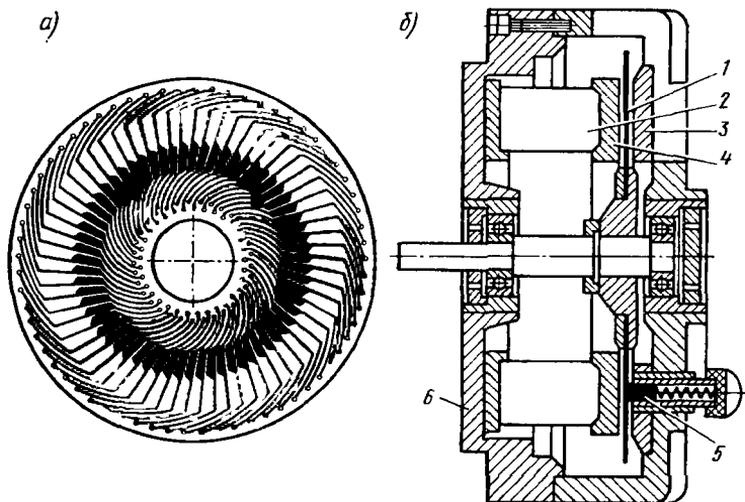


Рис. 8.5. Двигатель постоянного тока с дисковым якорем: *а* — дисковый якорь, *б* — устройство (продольный разрез) двигателя

цового) и отсутствием магнитных потерь в сердечнике якоря. Большой немагнитный промежуток между постоянным магнитом и статорной значительно ослабляет действие реакции якоря (см. § 6.4), что благоприятно влияет на свойства двигателя.

Электромеханическая постоянная времени двигателей с полым якорем серии ДПР $T_{эм} = 15 \div 20$ мс.

Двигатель постоянного тока с дисковым якорем. Якорь такого двигателя — это пластмассовый диск, на торцевые поверхности которого печатным способом нанесена обмотка якоря (рис. 8.5, *а*). Такая конструкция якоря обусловила видоизменение и других элементов двигателя (рис. 8.5, *б*). Возбуждение двигателя осуществляется постоянными магнитами 2, расположенными на статоре 6 и обращенными своими полюсными наконечниками 4 к одной стороне дискового якоря 1. С другой стороны якоря размещено кольцо 3 из ферромагнитного материала, выполняющее функцию неподвижного сердечника якоря, т. е. это элемент магнитной системы двигателя. Возможна конструкция подобного двигателя с электромагнитным возбуждением. В этом случае каждый сердечник полюса снабжен полюсной катушкой. Обычно двигатели с дисковым якорем не имеют отдельного коллектора, а электрический контакт щеток 5 и обмотки якоря происходит непосредственно на одной из сторон печатного якоря.

Электромагнитный момент в двигателях с дисковым якорем создается так же, как и в двигателях обычной конструкции.

Обмотка якоря наносится на обе стороны пластмассового диска электрохимическим способом, методом травления фольги. Так как секции печатной обмотки одновитковые, а количество секций ограничено площадью диска, то двигатели с дисковым якорем обычно выполняют на низкое напряжение.

Легкий якорь, не имеющий стального сердечника, обеспечивает двигателям с дисковым якорем высокое быстродействие и улучшенные условия работы щеточно-коллекторного узла. Недостаток двигателей с дисковым якорем — ограниченный срок службы, обусловленный износом печатной обмотки якоря, имеющей скользящий контакт со щетками. В некоторых конструкциях двигателей этот недостаток устраняют применением отдельного коллектора, но при этом усложняется устройство двигателя.

Двигатель с гладким (беспазовым) якорем. В отличие от двигателя с зубцовым якорем двигатель с беспазовым (гладким) якорем не имеет зубцов на сердечнике якоря, а двухслойная обмотка якоря расположена на гладкой поверхности сердечника (рис. 8.6). Якорь бандажуется стеклотентой и заливается в вакууме компаундом или пропитывается лаком. Исполнительные двигатели с гладкой конструкцией якоря имеют следующие достоинства: магнитная индукция в зазоре двигателя в 2—3 раза больше, чем при зубцовом якоре, в котором большое значение магнитной индукции недопустимо из-за сильного магнитного насыщения зубцового слоя якоря и резко возрастающих при этом магнитных потерь; открытое расположение проводников обмотки якоря на гладком сердечнике и отсутствие магнитных потерь в зубцовом слое позволяют существенно увеличить нагрузку двигателя при заданных габаритных размерах; большой немагнитный промежуток между сердечником якоря и главными полюсами и открытое расположение проводников обмотки якоря способствуют безыскровой работе щеточно-коллекторного узла и ослабляют действие реакции якоря, что повышает надежность двигателей и стабильность их характеристик. Обычно для возбуждения исполнительных двигателей с гладким якорем применяют постоянные магниты. Из рассмотренных малоинерционных двигателей машины с гладким якорем имеют наиболее высокое быстродействие. Это объясняется тем, что улучшенные условия коммутации позволяют применить в двигателях якорь малого диаметра D_2 и большой длины, что значительно снижает электромеханическую постоянную времени, так как $T_{эм} \sim D^2$, см. (8.19). Относительная электро-

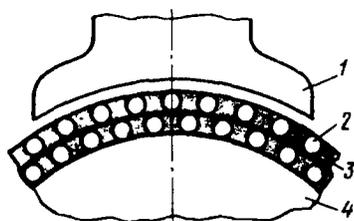


Рис. 8.6. Устройство гладкого якоря:
1 — главный полюс, 2 — обмотка якоря,
3 — компаунд, 4 — сердечник якоря

решенных малоинерционных двигателей машины с гладким якорем имеют наиболее высокое быстродействие. Это объясняется тем, что улучшенные условия коммутации позволяют применить в двигателях якорь малого диаметра D_2 и большой длины, что значительно снижает электромеханическую постоянную времени, так как $T_{эм} \sim D^2$, см. (8.19). Относительная электро-

механическая постоянная времени $T_{эм}^* = T_{эм} / T_{эм.з}$, где $T_{эм.з}$ — электро-механическая постоянная времени двигателей с зубцовым якорем. Ниже приведены значения относительной электро-механической постоянной времени для двигателей с различной конструкцией якоря.

Конструкция якоря	зубцовый	полый	дисковый	гладкий
$T_{эм}^*$	1,0	0,4	0,6	0,07

В табл. 8.1 и 8.2 приведены технические данные некоторых типов серийных исполнительных двигателей постоянного тока с различной конструкцией якоря.

Таблица 8.1

Тип	Номинальные данные					$T_{эм}$, мс
	$P_{ном}$, Вт	$U_{ном}$, В	$I_{в}$, А	$I_{а}$, А	$M_{ном} \cdot 10^{-2}$	
Серия СЛ (зубцовый якорь)						
СЛ-121	5,0	110	0,07	0,21	1,4	—
СЛ-221	13	110	0,05	0,35	3,5	—
СЛ-281	26	24	0,26	2,4	5,0	—
СЛ-321	38	110	0,11	0,7	12,5	—
СЛ-569	175	110	0,11	2,2	47,5	—
Серия МИГ (гладкий якорь) с постоянными магнитами						
МИГ-10Б	10	12	—	1,4	1,6	4,5
МИГ-90А	90	27	—	4,5	28,6	3,8
МИГ-180А	180	27	—	8,9	57,3	3,0
МИГ-400А	400	60	—	8,3	127,6	4,5
МИГ-600А	600	110	—	6,3	191,0	5,4

Таблица 8.2

Тип	Номинальные данные				
	$n_{ном}$, об/мин	$M_{ном} \cdot 10^{-2}$ Н · м	$I_{а}$, А	$M_{ном} \cdot 10^{-2}$ Н · м	$I_{а}$, А
Серия ДПМ (якорь зубцовый) с постоянными магнитами					
ДПМ-20	9000	$U = 27 В$		$U = 12 В$	
		0,15	0,15	0,15	0,35
		0,20	0,15	0,20	0,25
ДПМ-25	9000	0,20	0,15	0,15	0,25
		0,35	0,25	0,35	0,65
		0,50	0,30	0,45	0,60
ДПМ-30	6000	0,50	0,22	0,50	0,52
		0,50	0,15	0,50	0,28
		0,70	0,40	1,0	1,2
ДПМ-35	6000	2,0	1,1	2,0	2,2
		Серия ДПР (якорь полый) с постоянными магнитами			
ДПР-12	6000	$U = 12 В$		$U = 6 В$	
		0,02	0,026	0,02	0,056
ДПР-22	6000	0,1	0,114	0,01	0,23

Тип	Номинальные данные				
	$n_{\text{НОМ}}$, об/мин	$M_{\text{НОМ}}$, 10^{-2} Н м	$I_{\text{с}}$, А	$M_{\text{НОМ}}$, 10^{-2} Н м	$I_{\text{с}}$, А
		$U = 12 \text{ В}$		$U = 27 \text{ В}$	
ДПР-32	6000	0.2	0.18	0.2	0,082
ДПР-42	6000	0.5	0.4	0.5	0.18
ДПР-52	6000	1,0	0,68	1,0	0,30
ДПР-62	6000	2.0	1.3	2.0	0,57

8.4. Асинхронные исполнительные двигатели

Двухфазные асинхронные двигатели получили наибольшее применение в качестве исполнительных двигателей. На статоре такого двигателя расположена двухфазная обмотка (см. § 4.3). Одна из обмоток фазы статора — это обмотка возбуждения OB . Она постоянно включена в сеть переменного тока на неизменное напряжение U_1 . Другая обмотка фазы статора — это обмотка управления OY , на нее подают сигнал управления напряжением U_y от блока управления $БУ$ (рис. 8.7, а, з).

Для работы асинхронного исполнительного двигателя необходимо, чтобы обмотка статора создавала вращающееся магнитное поле. Условие возникновения такого поля — наличие в двигателе пространственного и временного сдвига МДС обмоток фазы статора (см. § 4.2). Пространственный сдвиг МДС обеспечивается конструкцией

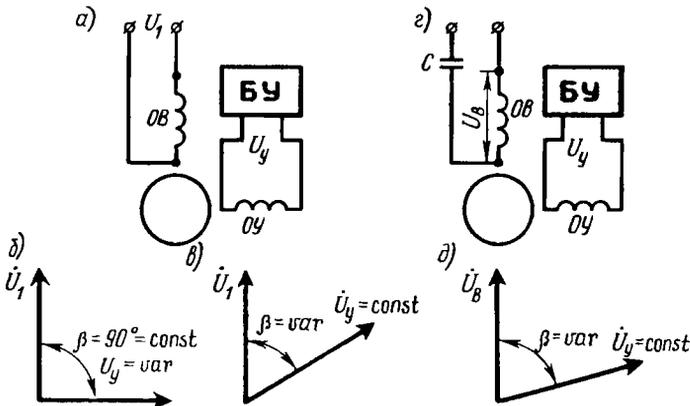


Рис. 8.7. Схемы включения и векторные диаграммы асинхронных исполнительных двигателей

двигателя: обмотки фазы статора расположены так, что их оси сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол 90 эл. град. Временной (фазовый) сдвиг МДС создается включением обмоток статора по специальным схемам, содержащим фазовращатель или фазосдвигающий конденсатор в цепи одной из обмоток фазы.

Для управления асинхронными исполнительными двигателями применяют три способа: амплитудный, фазовый и амплитудно-фазовый.

При *амплитудном управлении* напряжение управления \dot{U}_y независимо от его значения имеет фиксированный фазовый сдвиг на 90° относительно напряжения \dot{U}_1 (рис. 8.7, б). Управление исполнительным двигателем выполняется путем изменения значения (амплитуды) напряжения управления. Изменение частоты вращения и электромагнитного момента вызвано тем, что при равенстве МДС обмоток фазы статора ($F_v = F_b$) вращающееся поле в двигателе круговое, а при изменении напряжения U_y равенство нарушается, поле становится эллиптическим и на ротор двигателя действуют не только прямой (вращающий), но и обратный (тормозящий) момент. Реверс двигателя при амплитудном управлении достигается изменением фазы U_y на 180° . Относительное значение напряжения управления при амплитудном управлении определяется эффективным коэффициентом сигнала

$$\alpha_e = kU_y / U_1, \quad (8.20)$$

где

$$k = k_{об\ v} w_b / (k_{об\ v} w_v), \quad (8.21)$$

$k_{об\ v}$ и $k_{об\ y}$ — обмоточные коэффициенты обмоток возбуждения и управления; w_b и w_y — число витков в этих обмотках.

Круговое вращающееся поле статора соответствует $\alpha_e = 1$.

При *фазовом управлении* напряжение управления имеет постоянное значение (амплитуду) $U_y = U_1/k$, управление двигателем выполняется путем изменения угла фазового сдвига этого напряжения относительно \dot{U}_1 в диапазоне $\beta = 0 \div 90^\circ$ (рис. 8.7, в). Коэффициент сигнала при фазовом управлении $\alpha = \sin \beta$. При фазовом сдвиге между напряжениями \dot{U}_y и \dot{U}_1 на угол $\beta = 90^\circ$ вращающееся поле статора круговое и $\alpha = 1$. Если $\beta < 90^\circ$, магнитное поле статора становится эллиптическим, если $\beta = 0$ — пульсирующим. Если $\beta < 0$, т. е. угол фазового сдвига отрицательный, то двигатель изменяет направление вращения ротора.

При *амплитудно-фазовом управлении* в цепь обмотки возбуждения *ОВ* (рис. 8.7, г) включают фазосдвигающий конденсатор *С* (см. § 4.3). При изменении значения (амплитуды) напряжения управления U_y изменяется ток в обмотке управления и возбуждения; это приводит к изменению как величины, так и фазы напряжения на обмотке воз-

буждения U_b (рис. 8.7, δ). Емкость конденсатора C выбирается такой, чтобы при номинальном напряжении управления $U_{y \text{ ном}}$ и неподвижном роторе ($n_2 = 0$) вращающееся поле в двигателе было круговым. Этому режиму соответствует коэффициент сигнала $\alpha = \alpha_0$. При других значениях напряжения управления вращающееся поле в двигателе становится эллиптическим. Реверс двигателя достигается так же, как и при амплитудном способе управления.

У асинхронных двигателей существует два вида самохода, обусловленных параметрическими и технологическими причинами. Причина параметрического самохода — неправильный выбор параметров двигателя при его проектировании. Причина технологического самохода — появление в двигателе разного рода дефектов.

Параметрический самоход возникает при снятии управляющего сигнала. Силовые асинхронные двигатели имеют небольшое активное сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора и работают с малым критическим скольжением (см. § 3.5). Они непригодны в качестве исполнительных, так как обладают самоходом. Это объясняется тем, что при снятии сигнала управления (что эквивалентно отключению обмотки управления) двигатель продолжает работать как однофазный (см. § 4.1). Точка A на механической характеристике I двухфазного асинхронного двигателя (рис. 8.8, a) определяет режим работы с нагрузочным моментом $M_{\text{ном}}$ при наличии напряжения управления. После снятия сигнала управления поле статора становится пульсирующим и режим работы двигателя будет определяться точкой B на характеристике 3 однофазного двигателя. При этом электромагнитный момент двигателя остается положительным и будет вращать ротор в прежнем направлении (с меньшей частотой вращения). В результате при $\alpha_e = 0$ двигатель самопроизвольно вращается, что недопустимо в системах автоматики. Если в двигателе увеличить активное сопротивление обмотки ротора, то форма механических характеристик, соответствующих прямому $M_{\text{пр}}$ (график 1), обратному $M_{\text{обр}}$ (график 2) и результирующему $M = M_{\text{пр}} - M_{\text{обр}}$ (график 3) моментам, изменится (рис. 8.8, b): критические скольжения, соответствующие прямому $M_{\text{кр пр}}$ и обратному $M_{\text{кр обр}}$ моментам, возрастут до значений, превышающих единицу. При $\alpha_e = 0$ и переходе двигателя в одно-

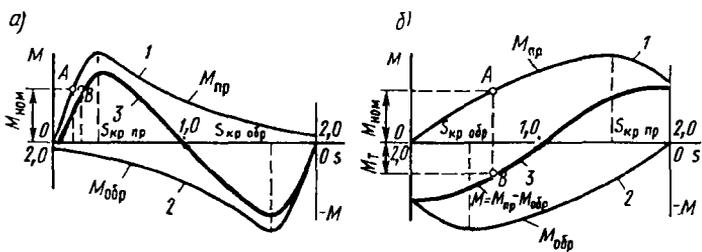


Рис. 8.8. К понятию о параметрическом самоходе

фазный режим электромагнитный момент двигателя становится тормозящим M_T (точка B на графике 3 рис. 8.8, б), оказывает на ротор тормозящее действие и исключает самоход. Для надежного устранения самохода активное сопротивление обмотки ротора принимают таким, чтобы $s_{кр} = 2 \div 4$. Это увеличивает электрические потери в роторе, $P_{32} = I_2^2 r_2$, снижает КПД двигателя и пусковой момент M_n (см. рис. 3.9), уменьшается пусковой ток I_n [см. (3.35)]. Последнее является положительным фактом, так как допускает эксплуатацию двигателя при неподвижном роторе, т. е. в режиме короткого замыкания. Возникающие при этом в обмотках токи короткого замыкания не превышают номинальных значений.

Технологический самоход возникает из-за замыканий между частью листов пакета статора, межвитковых замыканий или неодинаковой магнитной проводимости магнитной системы двигателя в различных радиальных направлениях. Качественные изготовления всех элементов двигателя и сборка — основные средства устранения технологического самохода.

8.5. Характеристики асинхронного исполнительного двигателя

Рассмотрим характеристики асинхронного исполнительного двигателя при амплитудном, фазовом и амплитудно-фазовом управлении. Обозначим: пусковой момент при круговом вращающемся магнитном поле $M_{но}$; относительный момент $m = M/M_{но}$, синхронная частота вращения $n_1 = f_1 60/p$; относительная частота вращения $v = n_2/n_1$.

Механические характеристики $m = f(v)$ при $\alpha_e = \text{const}$ асинхронных исполнительных двигателей при различных способах управления (рис. 8.9) почти не отличаются друг от друга. Все они криволинейны, особенно при больших значениях коэффициента сигнала. При ампли-

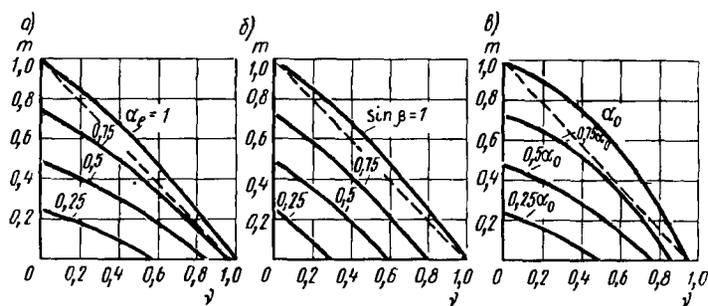


Рис. 8.9. Механические характеристики асинхронного исполнительного двигателя при амплитудном (а), фазовом (б), амплитудно-фазовом (в) управлении

тудно-фазовом управлении в зоне средних значений частоты вращения ($v = 0,2 \div 0,8$) двигатель развивает большой вращающий момент, чем при амплитудном и фазовом способах управления. Это объясняется тем, что с ростом частоты вращения увеличиваются напряжения U_B на обмотке возбуждения (см. рис. 8.7, з), магнитный поток возбуждения и, следовательно, электромагнитный вращающий момент двигателя. Частота вращения ротора приближается к синхронной ($v \approx 1$) только при наибольших значениях коэффициента сигнала ($\alpha_e = 1$; $\sin \beta = 1$; $\alpha/\alpha_0 = 1$). Чем меньше коэффициент сигнала, тем ниже частота вращения холостого хода, так как с уменьшением напряжения управления вращающееся поле статора становится все более эллиптическим, увеличивается обратная составляющая этого поля, создающая на роторе тормозной момент. Однако при амплитудно-фазовом управлении даже при значении коэффициента сигнала $\alpha/\alpha_0 = 1$ частота вращения холостого хода меньше синхронной ($v < 1$). Это объясняется тем, что значение фазосдвигающей емкости C выбирается из условия получения кругового вращающегося поля только при пуске двигателя, т. е. при $m = 1$, поэтому в режиме холостого хода при $m = 0$ вращающееся поле двигателя становится эллиптическим.

Регулировочные характеристики асинхронных исполнительных двигателей при амплитудном $n = f(\alpha_e)$, фазовом $v = f(\sin \beta)$ и амплитудно-фазовом $v = f(\alpha/\alpha_0)$ способах управления (рис. 8.10). Эти характеристики криволинейны. Для всех способов управления начальные участки регулировочных характеристик при небольшой частоте вращения очень близки к прямолинейным, поэтому асинхронные исполнительные двигатели целесообразно использовать при небольших частотах вращения ($v < 0,4$). При этом исполнительные двигатели рассчитаны на работу от сети переменного тока с частотой 400—500 Гц.

Из регулировочных характеристик следует, что минимальное значение сигнала управления (α_e ; $\sin \beta$; α/α_0), при котором ротор дви-

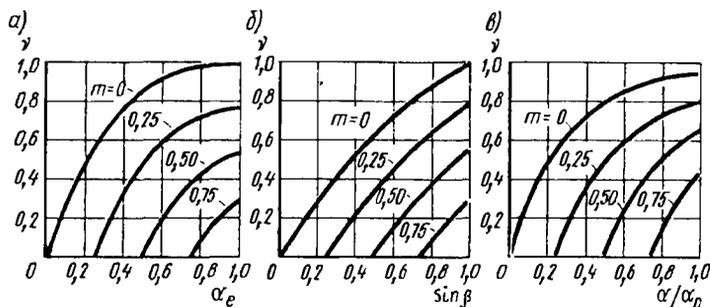


Рис. 8.10. Регулировочные характеристики асинхронного исполнительного двигателя при амплитудном (а), фазовом (б), амплитудно-фазовом (в) управлении

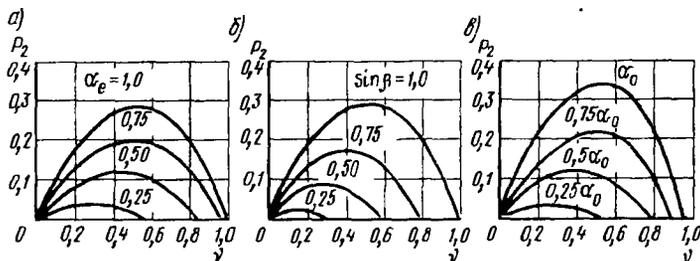


Рис. 8.11. Зависимость механической мощности от частоты вращения асинхронного исполнительного двигателя при амплитудном (а), фазовом (б), амплитудно-фазовом (в) управлении

двигателя с нагрузкой на валу приводится во вращение (напряжение трогания), равно относительному значению электромагнитного момента m .

Зависимость механической мощности от частоты вращения $p_2 = f(\nu)$ при неизменном коэффициенте сигнала показана на рис. 8.11. Анализ характеристик показывает: при всех способах управления они нелинейны; наибольшее значение механической мощности двигателя соответствует частоте вращения $\nu = 0,52 \pm 0,58$; наибольшую механическую мощность двигатель развивает при амплитудно-фазовом, а наименьшую — при фазовом управлении.

С помощью зависимости $p_2 = f(\nu)$ можно определить номинальную мощность и частоту вращения асинхронного исполнительного двигателя. За номинальную механическую мощность принимают наибольшее значение мощности при коэффициенте сигнала $\alpha_e = 1$; $\sin \beta = 1$; $\alpha/\alpha_0 = 1$; за номинальную частоту вращения — частоту вращения, соответствующую номинальной мощности.

Выбор способа управления асинхронным исполнительным двигателем определяется условиями работы автоматической системы и требованиями, предъявляемыми со стороны системы к исполнительному двигателю. Однако наибольшее практическое применение получил амплитудно-фазовый способ управления с включением фазосдвигающего конденсатора в цепь обмотки возбуждения (см. рис. 8.7, з). Это объясняется простотой схемы управления и высоким значением коэффициента мощности ($\cos \varphi_1 = 0,8 \pm 0,95$).

8.6. Устройство асинхронных исполнительных двигателей

Как уже отмечалось, к исполнительным двигателям предъявляется требование быстрейшего действия (см. § 8.1), которое количественно оценивается электромеханической постоянной времени $T_{эм}$, опреде-

ляемой выражением (8.19) с заменой n_0 на n_1 (синхронная частота вращения).

В качестве асинхронных исполнительных двигателей наиболее часто используют асинхронные двигатели обычной конструкции с короткозамкнутой обмоткой ротора с повышенным активным сопротивлением обмотки ротора r_2 (см. § 8.4) и асинхронные двигатели с полым немагнитным ротором.

Асинхронный двигатель с короткозамкнутой обмоткой ротора. Такой двигатель обычно применяют, если к быстрдействию исполнительного двигателя не предъявляется повышенных требований. Для устранения параметрического самохода стержня обмотки ротора двигателя с короткозамкнутой обмоткой выполняют из сплава с повышенным активным сопротивлением, например латуни.

Так как электромеханическая постоянная времени прямо пропорциональна квадрату диаметра ротора ($T_{эм} \sim D_2^2$), то быстрдействие двигателя можно повысить, если уменьшить диаметр ротора и увеличить его длину l_2 . Для асинхронных исполнительных двигателей обычной конструкции отношение этих размеров: $l_2/D_2 = 1,6 \div 2,4$. Дальнейшее увеличение этого отношения затруднено, так как при слишком большой длине ротора l_2 несоосность внутренней поверхности статора и поверхности отверстий в подшипниковых щитах под посадку подшипников становится недопустимой. Для устранения этого недостатка применяют «сквозную» конструкцию асинхронного двигателя (рис. 8.12). Внутренний диаметр статора равен диаметру расточки отверстий в подшипниковых щитах, что позволяет окончательную механическую обработку указанных поверхностей вести одновременно, после установки на статор подшипниковых щитов. Такой метод изготовления сводит к минимуму возможную несоосность обрабатываемых поверхностей, обеспечивает в двигателе малый воздушный зазор (не более 0,03—0,05 мм), что способствует повышению электромагнитного момента двигателя и увеличению его КПД и $\cos \phi$. Данная конструкция допускает уменьшение диаметра ротора

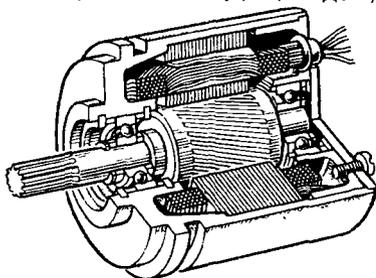


Рис. 8.12. Устройство асинхронного исполнительного двигателя «сквозной» конструкции

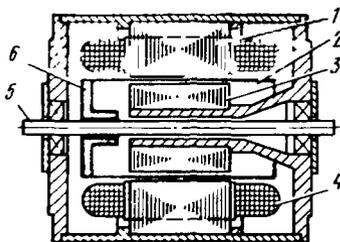


Рис. 8.13. Устройство асинхронного исполнительного двигателя с полым немагнитным ротором

до значений, при которых отношение длины ротора к его диаметру $l_2/D_2 = 2—3$, что значительно повышает быстродействие двигателя.

Асинхронный двигатель с полым немагнитным ротором. Для повышения быстродействия исполнительного двигателя были созданы асинхронные исполнительные двигатели с полым немагнитным ротором. Полюый немагнитный ротор представляет собой тонкостенный алюминиевый стакан 2 (рис. 8.13), закрепленный на валу 5 посредством втулки 6. Такой ротор имеет повышенное сопротивление r_2 , небольшую массу, а следовательно, малое значение электро механической постоянной времени. Двигатель имеет два статора — внешний 1 с обмоткой 4 и внутренний 3 без обмотки, расположенный внутри полого стакана ротора. Внутренний статор необходим для уменьшения магнитного сопротивления основному магнитному потоку двигателя. Возможна конструкция двигателя, когда обмотка статора расположена на внутреннем статоре.

По сравнению с исполнительными двигателями с короткозамкнутой обмоткой ротора, двигатели с полым немагнитным ротором имеют большие габаритные размеры и невысокий КПД. Это объясняется тем, что между наружным и внутренним статорами имеется значительный немагнитный промежуток, в котором замыкается основной магнитный поток двигателя.

Немагнитный промежуток складывается из толщины алюминиевого стакана и двух воздушных зазоров между поверхностями ротора и статоров. Увеличение немагнитного промежутка на пути основного магнитного потока способствует росту намагничивающего тока, а следовательно, снижению коэффициента мощности двигателя и КПД. Намагничивающий ток достигает 80—90% номинального тока в цепи статора.

Достоинства асинхронных двигателей с полым немагнитным ротором: высокое быстродействие, большой диапазон регулирования частоты вращения, стабильность характеристик, малощумность в работе.

Сравнение технических данных асинхронных исполнительных двигателей различной конструкции показывает, что у двигателей с короткозамкнутой обмоткой ротора благодаря «сквозной» конструкции и уменьшенному диаметру ротора постоянная времени $T_{эм}$ меньше, чем у двигателей с полым немагнитным ротором (исключения составляют двигатели с полым немагнитным ротором, рассчитанные на частоту переменного тока 50 Гц). Относительное напряжение трогания $U_{тр}/U_{ном}$ у двигателей с короткозамкнутой обмоткой ротора в несколько раз больше, чем у двигателей с полым немагнитным ротором, так как в двигателях с короткозамкнутым ротором возникает сила одностороннего магнитного притяжения ферромагнитного сердечника ротора к сердечнику статора. Причи-

на возникновение этой силы — неравномерный воздушный зазор между статором и ротором. В двигателях «сквозной» конструкции при одностороннем зазоре, не превышающем 0,05 мм, даже незначительная неравномерность зазора вызывает заметные силы одностороннего магнитного притяжения, влияющие на напряжение трогания двигателя.

В автоматических приборных устройствах (автоматические мосты, потенциометры и т. п.), работающих от сети переменного тока частотой 50 Гц, в качестве исполнительного двигателя применяют асинхронные исполнительные двигатели с короткозамкнутой обмоткой ротора типа РД-09 или РД-09А, их потребляемая мощность 10 Вт, частота вращения ротора 1200 об/мин. Двигатели укомплектованы встроенным редуктором на цилиндрических зубчатых колесах. Редуктор имеет восемь вариантов исполнения, обеспечивающих получение следующих наибольших частот вращения выходного вала (при частоте вращения ротора 1200 об/мин): 192; 76,8; 30,7; 15,67; 8,76; 4,48; 2,51; 1,79. По своему внешнему виду и габаритам эти двигатели не отличаются от синхронного реактивного двигателя типа СД-54 (см. рис. 5.14).

■ 8.7. Шаговые исполнительные двигатели

Шаговые исполнительные двигатели преобразуют электрический управляющий сигнал в дискретное (скачкообразное) угловое перемещение выходного вала. Угол поворота вала, называемый угловым шагом, точно соответствует числу и порядку следования управляющих импульсов, поступающих на обмотки статора шагового двигателя. По принципу работы шаговые двигатели являются синхронными, так как электромагнитный момент, действующий на их ротор, создается силами магнитного притяжения полюсов статора и ротора.

Шаговые двигатели получили наибольшее применение в автоматизированном программном электроприводе. Используются шаговые двигатели с пассивным (невозбужденным) и активным (возбужденным) ротором.

Шаговые двигатели с пассивным ротором. Такие двигатели называют реактивными. Статор реактивного трехфазного шагового двигателя (рис. 8.14) имеет шесть явно выраженных полюсов (по два полюса на фазу), а ротор — два выступа (невозбужденных полюса). При прохождении импульса тока в обмотке фазы 1 статора ротор занимает положение, при котором его ось совмещается с осью 1—1 полюсов статора. В момент времени t_1 при появлении импульса тока в фазе 2 на ротор действуют силы магнитного притяжения, обусловленные одновременным намагничиванием полюсов 1—1 и 2—2. В

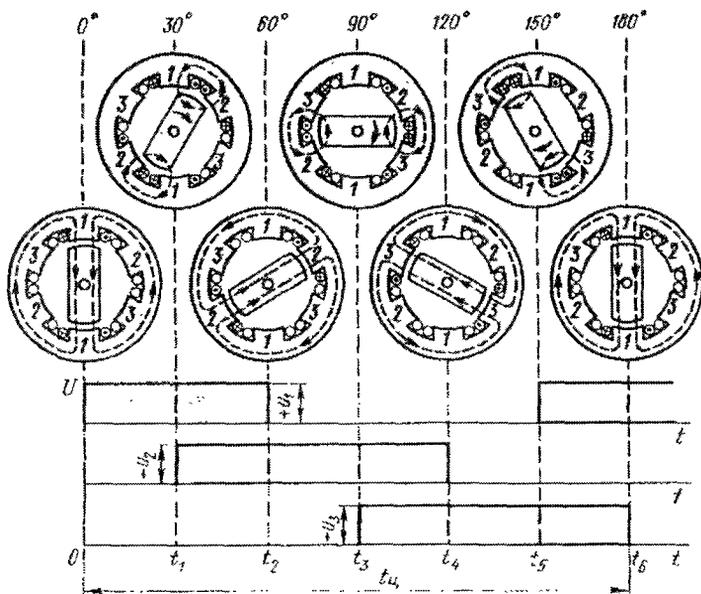


Рис. 8.14. К принципу действия реактивного шагового двигателя

результате ротор повернется на угловой шаг $\alpha_{ш} = 30^\circ$. В момент времени t_2 импульс тока в фазе 1 прекратится и ротор, совершив еще один шаг $\alpha_{ш} = 30^\circ$, займет положение по оси 2—2. В момент t_3 появится импульс тока в фазе 3 и ротор, повернувшись на 30° , займет среднее положение между полюсами 2—2 и 3—3. Суммарный угол поворота ротора составит 90° . В моменты времени t_4 , t_5 и t_6 ротор также будет совершать угловые шаги по 30° и в конце цикла займет положение по оси полюсов статора 1—1, совершив половину оборота (180°). В последующие циклы подачи на обмотку статора управляющих, импульсов напряжения u_1 , u_2 и u_3 процессы в шаговом двигателе будут повторяться. Двигатель работает по шеститактной схеме коммутации с раздельно-совместным включением обмоток фазы: 1→1,2→2→2,3→3→3,1, ...

Реактивные шаговые двигатели работают от однополярных импульсов, так как изменение полярности импульса не изменяет направления сил, действующих на невозбужденный ротор. Чтобы изменить направление вращения ротора (реверс) шагового двигателя, необходимо поменять схему коммутации обмоток статора, например принять 1→1,3→3→3,2→2→2,1 ...

Если в рассматриваемом двигателе принять схему коммутации с раздельным включением обмоток статора: 1→2→3 ..., то угловой шаг

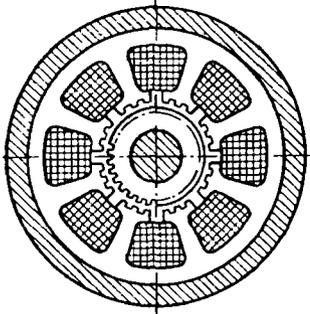


Рис. 8.15. Магнитная система реактивного шагового двигателя с электромагнитной редукцией

Уменьшают число полюсных выступов на роторе $2p_2$. Если в рассматриваемом двигателе применить ротор крестообразного сечения с $2p_2 = 4$, то при раздельно-совместном включении обмоток фаз статора угловой шаг уменьшится вдвое: $\alpha_{ш} = 15^\circ$. Дальнейшее уменьшение шага возможно при использовании в двигателе принципа редукции скорости (см. §7.1). На полюсных наконечниках статора и на поверхности цилиндрического ротора делают открытые пазы, придавая поверхностям этих элементов гребенчатую форму. Пазы на статоре и роторе выполняют с одинаковым шагом. На рис. 8.15 показана конструкция шагового двигателя с числом полюсов на статоре $2p_1 = 8$ и числом пазов на цилиндрическом роторе $Z_2 = 36$. Угловой шаг этого двигателя $\alpha_{ш} = 2,5^\circ$. Возможно и дальнейшее уменьшение шага.

Недостаток реактивных шаговых двигателей с электромагнитной редукцией — небольшой вращающий момент.

Один из основных параметров шаговых двигателей — частота приемистости $f_{пр}$, представляющая собой наибольшую частоту следования управляющих импульсов, при которой ротор двигателя втягивается в синхронизм с места без потери шага.

Частота приемистости зависит от нагрузки на валу шагового двигателя: в режиме холостого хода частота приемистости наибольшая $f_{пр \max}$, а с появлением нагрузки — уменьшается. Частота приемистости при номинальной нагрузке реактивных шаговых двигателей $f_{пр \text{ ном}} \leq 1000 \div 1200$ Гц. При увеличении углового шага частота приемистости уменьшается.

Шаговый двигатель работает совместно с коммутатором, преобразующим заданную последовательность управляющих импульсов в m_1 -фазную систему импульсов напряжения прямоугольной формы.

Шаговые двигатели с активным ротором. Ротор такого двигателя выполнен из постоянного магнита, а статор — такой же, как у

двигателя увеличится в два раза: $\alpha_{ш} = 60^\circ$. В общем случае угловой шаг двигателя

$$\alpha_{ш} = 360^\circ / (2p_2 m_1 k_\phi), \quad (8.22)$$

где $2p_2$ — число полюсных выступов на роторе; m_1 — число фаз обмотки статора; k_ϕ — коэффициент, зависящий от способа включения фаз обмотки статора (при раздельном включении $k_\phi = 1$, при раздельно-совместном $k_\phi = 2$).

Уменьшение углового шага $\alpha_{ш}$ повышает быстродействие, так как сокращается время на перемещение ротора при отработке сигнала и увеличивается точность работы шагового двигателя. Для уменьшения углового шага $\alpha_{ш}$ увеличивают

число полюсных выступов на роторе $2p_2$. Если в рассматриваемом двигателе применить ротор крестообразного сечения с $2p_2 = 4$, то при раздельно-совместном включении обмоток фаз статора угловой шаг уменьшится вдвое: $\alpha_{ш} = 15^\circ$. Дальнейшее уменьшение шага возможно при использовании в двигателе принципа редукции скорости (см. §7.1). На полюсных наконечниках статора и на поверхности цилиндрического ротора делают открытые пазы, придавая поверхностям этих элементов гребенчатую форму. Пазы на статоре и роторе выполняют с одинаковым шагом. На рис. 8.15 показана конструкция шагового двигателя с числом полюсов на статоре $2p_1 = 8$ и числом пазов на цилиндрическом роторе $Z_2 = 36$. Угловой шаг этого двигателя $\alpha_{ш} = 2,5^\circ$. Возможно и дальнейшее уменьшение шага.

Недостаток реактивных шаговых двигателей с электромагнитной редукцией — небольшой вращающий момент.

Один из основных параметров шаговых двигателей — частота приемистости $f_{пр}$, представляющая собой наибольшую частоту следования управляющих импульсов, при которой ротор двигателя втягивается в синхронизм с места без потери шага.

Частота приемистости зависит от нагрузки на валу шагового двигателя: в режиме холостого хода частота приемистости наибольшая $f_{пр \max}$, а с появлением нагрузки — уменьшается. Частота приемистости при номинальной нагрузке реактивных шаговых двигателей $f_{пр \text{ ном}} \leq 1000 \div 1200$ Гц. При увеличении углового шага частота приемистости уменьшается.

Шаговый двигатель работает совместно с коммутатором, преобразующим заданную последовательность управляющих импульсов в m_1 -фазную систему импульсов напряжения прямоугольной формы.

Шаговые двигатели с активным ротором. Ротор такого двигателя выполнен из постоянного магнита, а статор — такой же, как у

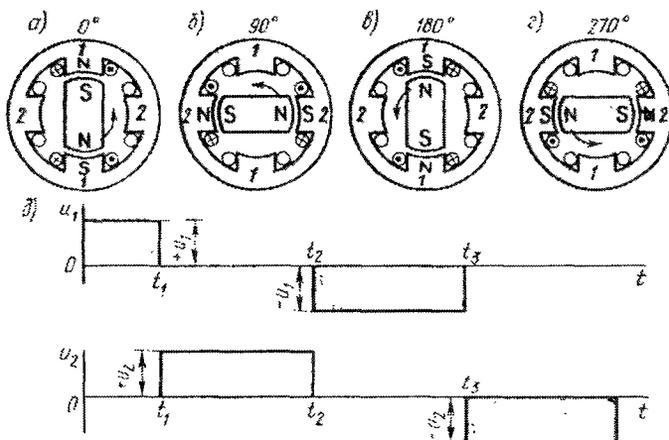


Рис. 8.16. К принципу действия шагового двигателя с активным ротором

реактивных шаговых двигателей, т. е. с сердечником с явно выраженными полюсами и многофазной обмоткой. В шаговом двигателе с активным ротором можно применять двухполярные импульсы напряжения, так как с изменением направления тока в обмотке фазы статора меняется магнитная полярность соответствующих полюсов. Так как ротор двигателя намагничен, то изменение полярности полюсов статора вызывает изменение направления сил взаимодействия между полюсами статора и ротора.

Рассмотрим принцип действия двухфазного двигателя с двухполюсным постоянным магнитом на роторе и четырьмя явно выраженными полюсами на статоре (рис. 8.16).

При подаче импульса напряжения положительной полярности ($+u_1$) в обмотку 1 фазы два полюса этой фазы приобретают магнитную полярность, как на рис. 8.16, а, при этом ротор занимает вертикальное положение, обусловленное направлением сил взаимного притяжения полюсов статора и ротора разноименной полярности. В момент времени t_1 (рис. 8.16, д) импульс в фазе 1 прекращается, поступает положительный импульс ($+u_2$) в фазу 2. При этом обмотка 1 фазы обесточивается, а полюса фазы 2 приобретают магнитную полярность, как на рис. 8.16, б. В результате ротор поворачивается против часовой стрелки на $\alpha_{\text{ш}} = 90^\circ$. В момент времени t_2 на обмотку фазы 1 подается импульс напряжения отрицательной полярности ($-u_1$), а с обмотки 2 фазы импульс напряжения снимается. В результате полюса этой фазы приобретут полярность, как на рис. 8.16, в, и ротор повернется против часовой стрелки еще на 90° . Затем в момент времени t_3 , импульс напряжения отрицательной полярности поступит в обмотку

2 фазы и ротор повернется еще на 90° (рис. 8.16, з). При подаче импульса напряжения $(+u_1)$ на обмотку фазы 1 ротор заканчивает полный оборот и занимает исходное положение (см. рис. 8.16, а). Работа шагового двигателя соответствует коммутации с раздельным включением обмоток фазы и разнополярными импульсами напряжения $(+u_1) \rightarrow (+u_2) \rightarrow (-u_1) \rightarrow (-u_2) \rightarrow (+u_1)$. Если в рассмотренном двигателе применить коммутацию с раздельно-совместным включением обмоток фазы $(+u_1) \rightarrow (+u_1)(+u_2) \rightarrow (+u_2) \rightarrow (+u_2)(-u_1) \rightarrow (-u_1) \rightarrow (-u_1)(-u_2) \rightarrow (-u_2)(+u_1) \rightarrow (+u_1)$, то шаговый двигатель будет работать с угловым шагом $\alpha_{\text{ш}} = 45^\circ$, при этом вращающий момент на роторе возрастет примерно в 1,5 раза.

Шаговые двигатели с активным ротором работают также с однополярными импульсами напряжения (что упрощает конструкцию коммутатора), но при этом число обмоток фазы на статоре (и число полюсов) увеличивается. По сравнению с реактивными, шаговые двигатели с активным ротором создают большие вращающие моменты, обеспечивают фиксацию ротора при снятии управляющего сигнала. Недостаток двигателей с активным ротором — большой угловой шаг ($15\text{—}90^\circ$). Это объясняется технологическими трудностями изготовления ротора с постоянными магнитами при большом числе полюсов. Для уменьшения углового шага увеличивают число фаз в обмотке статора или применяют двухстаторную конструкцию. Двухстаторные двигатели имеют два одинаковых сердечника статора с одинаковыми обмотками, на валу размещены два ротора, при этом сердечники статоров смещены относительно друг друга на половину зубцового деления (роторы расположены соосно). Недостаток таких двигателей — сложность изготовления.

Из-за разнообразных требований, предъявляемых к исполнительным шаговым двигателям, были созданы специальные шаговые двигатели — линейные (см. § 3.10), волновые, с катящимся ротором (см. § 7.2).

Рассматривая принцип действия шагового двигателя, влияние нагрузочного момента на валу двигателя не учитывалось. Если на вал шагового двигателя действует нагрузочный момент $M_{\text{н}}$, то при переключении управляющего импульса с одной фазы на другую вектор МДС статора повернется на угол $\alpha_{\text{ш}}$, ротор двигателя, поворачиваясь за вектором МДС, будет отставать от него на угол $\Delta\theta_{\text{с}}$, называемый углом статической ошибки шагового двигателя, эл. град:

$$\Delta\theta_{\text{с}} = \arcsin(M_{\text{н}}/M_{\text{max}}), \quad (8.23)$$

где M_{max} — максимальный статический момент, соответствующий углу смещения ротора относительно вектора МДС статора $\theta = 90$ эл. град.

Быстродействие шаговых двигателей определяется скоростью протекания электромагнитных процессов при переключении управляющих импульсов напряжения с одной обмотки фаз статора на другую. Скорость протекания процессов оценивается электромагнитной постоянной времени, с,

$$T_3 = L_\Phi / r_\Phi, \quad (8.24)$$

где L_Φ — индуктивность обмотки фазы статора, Гн; r_Φ — активное сопротивление обмотки фазы, Ом.

Для повышения быстродействия шагового двигателя в обмотки фаз статора включают последовательно добавочные резисторы $R_{доб}$, тогда

$$T_3 = L_\Phi / (r_\Phi + R_{доб}). \quad (8.25)$$

Энергетический показатель шагового двигателя — потребляемая мощность P_1 .

Частота вращения шаговых двигателей регулируется изменением частоты подачи управляющих импульсов напряжения на обмотку статора, в зависимости от которой меняются режимы работы шаговых двигателей: статический, квазистатический, установившийся и переходные.

Статический режим — режим, при котором по обмоткам фаз статора проходит постоянный ток, создающий неподвижное в пространстве магнитное поле. При этом ротор двигателя находится в состоянии статического равновесия, а прикладываемый к валу нагрузочный момент отклоняет ротор в ту или иную сторону от уравновешенного состояния на $\Delta\theta_c$, т. е. на угол статической ошибки [см. (8.23)].

Квазистатический режим — режим работы шагового двигателя при единичных угловых шагах, когда к началу последующего шага все переходные процессы, связанные с обработкой предыдущего шага, полностью заканчиваются. Для обеспечения требуемой частоты обработки шагов в квазистатическом режиме применяют различные способы торможения ротора.

Установившийся режим — режим, соответствующий постоянной частоте следования управляющих сигналов. Ротор двигателя в этом режиме имеет постоянную частоту вращения, однако при переходе из одного установившегося состояния в другое могут возникать колебания ротора. Характер колебаний ротора зависит от соотношения между частотой следования управляющих сигналов f_y и частотой собственных колебаний ротора f_0 : если $f_y < f_0$, то возникают свободные колебания ротора с частотой f_0 , если $f_y > f_0$ — возникают вынужденные колебания ротора с частотой f_y ; если $f_y = f_0$ или f_y/f_0 — целое число, то возникает электромеханический резонанс, который при недостаточном демпфировании ротора приводит к нарушению работы шагового двигателя и выпадению его из синхронизма.

Частота собственных колебаний ротора шагового двигателя

$$f_0 \approx 0,135 \sqrt{M_{\max} p_1 / (J_2 + J_n)}, \quad (8.26)$$

где J_2, J_n — моменты инерции ротора и нагрузки, кг · м².

Переходные режимы — это основные режимы работы (пуска, ускорения, реверса) исполнительного шагового двигателя, работающего в автоматизированном электроприводе.

Таблица 8.3

Тип двигателя	Параметры							$U, В$	$P_1, Вт$
	m_1	$\alpha_{ш-град}$	$M_{маз} \cdot 10^{-2}$ Н м	$M_{ном} \cdot 10^{-2}$ Н м	$f_{пр макс}$ Гц	$f_{пр ном}$ Гц			
Реактивные шаговые									
ЩДР-231	4	9	1.2	0.4	1500	700	28	20	
ЩДР-523	4	3	16	4.0	1500	600	28	56	
ЩДР-721	4	3	19	6.0	1100	600	14	70	
ЩД-10/100	4	15	0,5	0,1	—	100	14	2	
ЩД-2	3	16	150	30	—	200	12	200	
Шаговые с активным ротором									
ДШ-0.25А	4	22,5	15	2,5	300	250	27	40	
ДШ-0 4А	4	22,5	21	4,0	250	200	27	80	
ДШ-1А	4	22,5	60	10	200	150	27	145	
ДШ-4А	4	18	160	40	150	100	27	230	
ДШ-6А	4	18	260	60	100	80	27	270	

Основное требование к шаговым двигателям в этих режимах — точная отработка частоты следования управляющих сигналов без потери шага при любом характере изменения частоты.

В табл. 8.3 приведены технические данные некоторых типов шаговых двигателей, выпускаемых отечественной промышленностью.

Контрольные вопросы

1. Каковы специфические требования к исполнительным двигателям?
2. Каковы достоинства и недостатки якорного и полюсного способов управления исполнительными двигателями постоянного тока?
3. Какие применяются способы управления асинхронными исполнительными двигателями? Каковы особенности каждого из них?
4. Что такое частота приемистости шагового двигателя?
5. Какие существуют способы уменьшения углового шага в шаговых двигателях?

Глава 9 Тахогенераторы

■ 9.1. Общие сведения

В системах автоматики и вычислительных устройствах широко применяются *информационные электрические машины*, преобразующие механические величины (частоту вращения, ускорение, угол поворота и т. п.) в электрический сигнал. Один из видов информационных электрических машин — *тахогенератор*, который преобразует частоту вращения какого-либо вала в электрический сигнал (выходное напряжение).

Тахогенераторы используются для измерений с целью контроля частоты вращения вала какого-либо устройства. Такие тахогенераторы называют *измерительными*. Для получения сигналов в системах регулирования или стабилизации частоты вращения вала автоматизированного объекта такие тахогенераторы называют *корректирующими*. Тахогенераторы применяют также в качестве дифференцирующих и интегрирующих звеньев в вычислительных устройствах.

Зависимость выходного напряжения тахогенератора $U_{\text{вых}}$ от частоты вращения ротора (якоря) n определяется выходной характеристикой $U_{\text{вых}} = f(n)$. Уравнение идеальной выходной характеристики тахогенератора

$$U_{\text{вых}} = c_U n, \quad (9.1)$$

где c_U — крутизна выходной характеристики, определяющая чувствительность тахогенератора к изменениям частоты вращения.

Чем больше крутизна c_U тем чувствительнее и точнее система с тахогенератором.

Тахогенераторы должны удовлетворять ряду специфических требований. Выходная характеристика тахогенератора, представляющая собой зависимость напряжения на выходе $U_{\text{вых}}$ от частоты вращения n , должна максимально приближаться к прямолинейной и иметь наибольшую крутизну. При этом на форму выходной характеристики практически не должны влиять внешние факторы (температура, влажность, давление и т. п.). Напряжение на выходе тахогенератора при $n = 0$, называемое остаточным, должно быть минимальным. Напряжение $U_{\text{вых}}$ должно быть симметричным, т. е. при вращении тахогенератора с одинаковой частотой, но в разные стороны $|+n| = |-n|$ абсолютные значения выходных напряжений должны быть одинаковы:

$$|U_{\text{вых}}| = |U'_{\text{вых}}|. \quad (9.2)$$

При нарушении этого условия появляется *ошибка несимметрии* тахогенератора, %

$$\Delta u_{\text{сим}} = \frac{|U_{\text{вых}}| - |U'_{\text{вых}}|}{0,5(|U_{\text{вых}}| + |U'_{\text{вых}}|)} 100, \quad (9.3)$$

где $U_{\text{вых}}$ и $U'_{\text{вых}}$ — выходное напряжение при вращении ротора тахогенератора соответственно по часовой и против часовой стрелки (обе величины принимают со знаком плюс). Выходная мощность тахогенератора должна быть достаточной для работы подключаемых к нему приборов. Кроме того, пульсация выходного напряжения тахогенератора, обусловленная электромагнитными процессами в нем, должна быть минимальной.

Необходимая степень соответствия перечисленным требованиям определяется назначением тахогенератора. Тахогенераторы для счетно-решающих устройств должны иметь выходную характеристику, максимально приближенную к прямолинейной, чтобы погрешность воспроизведения линейной зависимости $U_{\text{вых}} = f(n)$ не превышала 0,02—0,1%; для измерительных тахогенераторов эта погрешность может составлять 1—2,5%. Корректирующие тахогенераторы, применяемые в системах автоматики для получения ускоряющих и замедляющих сигналов, должны иметь максимально возможную крутизну выходной характеристики, а погрешность воспроизведения линейной функции в них может достигать нескольких процентов.

По принципу действия и устройству тахогенераторы бывают переменного и постоянного тока. Наибольшее практическое применение в устройствах автоматики получили тахогенераторы асинхронные и постоянного тока.

9.2. Тахогенераторы переменного тока

Асинхронные тахогенераторы. Своим устройством асинхронный тахогенератор не отличается от асинхронного исполнительного двигателя с полым немагнитным ротором (см. рис. 8.13). В отличие от исполнительного двигателя полый ротор тахогенератора изготавливают из сплава с повышенным удельным сопротивлением, не зависящим от температуры (константан, манганин и т. п.). Одна из обмоток статора тахогенератора — обмотка возбуждения OB , другая — генераторная обмотка OG (рис. 9.1). Считаем ось обмотки возбуждения продольной $d-d$, а ось генераторной обмотки — поперечной $q-q$. Рассмотрим процессы, происходящие в асинхронном тахогенераторе при неподвижном роторе ($n = 0$). При включении обмотки возбуждения в сеть переменного тока напряжением U_1 и частотой f_1 возникает МДС

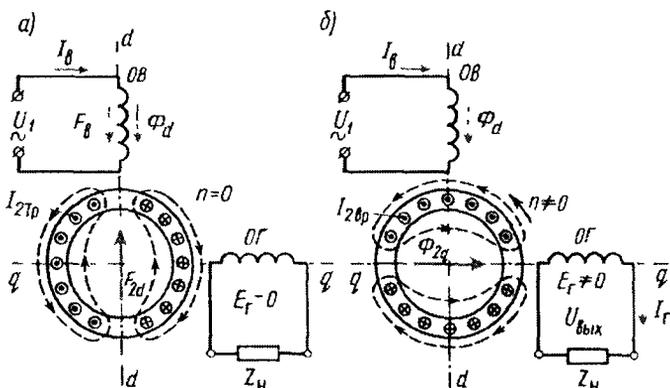


Рис. 9.1. К принципу действия асинхронного тахогенератора

F_b и в магнитопроводе генератора наводится пульсирующий магнитный поток Φ_b , направленный по оси $d-d$. Пронизывая полюс ротора, поток наводит в нем (как во вторичной обмотке трансформатора) ЭДС $E_{тр}$, называемую *трансформаторной*. В генераторной обмотке OG поток Φ_b не наводит ЭДС, так как ось обмотки $q-q$ расположена под углом 90° эл. град к оси обмотки возбуждения $d-d$. Под действием $E_{тр}$ в стенках полого стакана возникнут токи $I_{2тр}$, которые благодаря повышенному активному сопротивлению ротора практически совпадают по фазе с $E_{тр}$. Токи $I_{2тр}$ создают МДС ротора F_{2d} , направленную по продольной оси встречно МДС F_b возбуждения. В результате взаимодействия МДС F_b и F_{2d} создается результирующий магнитный поток по продольной оси Φ_d , пульсирующий с частотой тока сети f_1 (рис. 9.1, а).

Если ротор тахогенератора вращать с частотой n , то в результате пересечения стенками стакана силовых линий потока Φ_d в роторе наводится ЭДС вращения, мгновенное значение которой

$$e_{2вр} = c'_d B_d l_2 n, \quad (9.4)$$

где B_d — магнитная индукция в зазоре от магнитного потока Φ_d , l_2 — длина ротора, находящегося в магнитном поле.

Электродвижущая сила вращения прямо пропорциональна частоте вращения ротора n , а частота этой ЭДС зависит от частоты пульсаций магнитного потока Φ_d , т. е. равна частоте тока в обмотке возбуждения f_1 . Пульсирующий магнитный поток Φ_d создает синусоидальное распределение магнитной индукции B_d в воздушном зазоре, поэтому максимальные значения ЭДС вращения $E_{2вр \max}$ будут наводиться в точках стенок ротора, когда последние расположены по продольной оси $d-d$ (рис. 9.1, б). Под действием ЭДС вращения в роторе появятся токи $I_{вр}$, которые благодаря повышенному активному сопротивле-

нию ротора практически совпадают по фазе с ЭДС вращения. Токи $I_{вр}$ создают МДС ротора E_{2q} , направленную по поперечной оси. Эта МДС наводит пульсирующей с частотой f_1 магнитный поток Φ_{2q} , который создает в *ОГ* переменную ЭДС, действующее значение которой, B ,

$$E_r = 4,44 f_1 w_r k_{обг} \Phi_{2q}, \quad (9.5)$$

где w_r — число витков в *ОГ*; $k_{обг}$ — обмоточный коэффициент *ОГ*.

Таким образом, частота ЭДС E_r , приведенной в генераторной обмотке тахогенератора, равна частоте тока в обмотке возбуждения f_1 и не зависит от частоты вращения ротора. Зависимость ЭДС E_r от частоты вращения ротора n установим следующим образом: ЭДС вращения $e_{вр}$ [см. (9.4)] прямо пропорциональна частоте вращения n , следовательно, ток $I_{вр}$ и магнитодвижущая сила F_{2q} ротора также прямо пропорциональны частоте вращения n . В машине с полым немагнитным ротором немагнитный промежуток между внешним и внутренним статорами достаточно велик (см. рис. 8.13). Поэтому магнитное сопротивление $R_{мq}$, потоку ротора Φ_{2q} , по поперечной оси создается в основном за счет этого немагнитного промежутка и является практически постоянным, не зависящим от магнитного состояния стальных участков магнитопровода тахогенератора (сердечники наружного и внутреннего статоров). Таким образом, магнитный поток $\Phi_{2q} = F_{2q}/R_{мq}$ прямо пропорционален МДС F_{2q} , а следовательно, частоте вращения n , поэтому

$$\Phi_{2q} \sim F_{2q} \sim I_{вр} \sim E_r \sim n. \quad (9.6)$$

Учитывая (9.6), выражение (9.5) запишем так:

$$E_r = 4,44 c_\phi f_1 w_r k_{обг} n = c_U n, \quad (9.7)$$

где c_U — крутизна выходной характеристики, В/(об/мин).

При подключении нагрузки z_n на выход генераторной обмотки в ее цепи появится ток I_r . Обычно сопротивление нагрузки z_n достаточно велико, поэтому ток I_r — небольшой и не вызывает в генераторной обмотке значительного падения напряжения. Это позволяет с незначительным допущением принять $U_{вых} \approx E_r$, тогда

$$U_{вых} \approx E_r = c_U n. \quad (9.8)$$

Следовательно, величина (амплитуда) напряжения на выходе тахогенератора $U_{вых}$ прямо пропорциональна частоте вращения ротора, а частота этого напряжения равна частоте тока в обмотке возбуждения f_1 и не зависит от частоты вращения ротора.

Из рассмотрения принципа действия асинхронного тахогенератора следует, что его выходная характеристика прямолинейна [см. (9.8)]. Однако свойства реальных тахогенераторов отличаются от свойств идеального тахогенератора, так как они обладают некоторы-

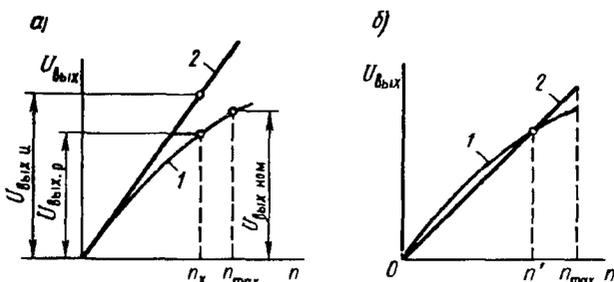


Рис. 9.2. Реальная (1) и идеальная (2) выходные характеристики асинхронного тахогенератора

ми погрешностями. Выходная характеристика тахогенератора (рис. 9.2, а, б, график 1) только в начальной части совпадает с идеальной характеристикой (график 2), а с ростом частоты вращения n становится криволинейной. Это приводит к появлению амплитудной погрешности

$$\Delta U_A = U_{\text{вых н}} - U_{\text{вых р}}, \quad (9.9)$$

где $U_{\text{вых н}}$, $U_{\text{вых р}}$ — напряжение на выходе идеального и реального асинхронного тахогенератора при заданной частоте вращения n_x .

Причина амплитудной погрешности в том, что напряжение $U_{\text{вых}}$ отличается от ЭДС E_r амплитудой и фазой и с ростом тока в ОГ эта разница увеличивается за счет роста падения напряжения в генераторной обмотке $i_r Z_r$.

Амплитудную погрешность выражают в процентах:

$$\Delta u_A = (\Delta U_A / U_{\text{вых ном}}) 100. \quad (9.10)$$

Сравнивая рис. 9.2, а, б, видим, что амплитудная погрешность будет минимальной, если идеальную выходную характеристику (прямая 2) провести так, чтобы она пересекла реальную характеристику 1 в точке, соответствующей частоте вращения:

$$n' = (\sqrt{3}/2)n_{\text{max}} \approx 0,87n_{\text{max}}, \quad (9.11)$$

где n_{max} — наибольшая частота вращения для данного типа асинхронного тахогенератора.

Амплитудная погрешность — комплексная величина, т. е. напряжения $\dot{U}_{\text{вых н}}$ и $\dot{U}_{\text{вых р}}$ различаются не только по модулю, но и по фазе. Поэтому появляется *фазовая погрешность*

$$\Delta \varphi = \varphi_{\text{н}} - \varphi_{\text{р}}, \quad (9.12)$$

где $\varphi_{\text{н}}$ и $\varphi_{\text{р}}$ — фазы выходного напряжения идеального и реального тахогенераторов.

Амплитудная и фазовая погрешности асинхронных тахогенераторов зависят от частоты вращения ротора, температуры, частоты тока питающей сети. Поэтому погрешности асинхронных тахогенераторов разделяют на скоростные, температурные и частотные.

Для уменьшения *скоростных погрешностей* используют тахогенераторы, рассчитанные на работу от сети повышенной частоты (400, 500 или 1000 Гц), у которых большая синхронная частота вращения. В этом случае предел измеряемой частоты вращения устанавливают таким, чтобы относительная частота вращения $\nu = n/n_1$ была небольшой, т. е. чтобы тахогенератор работал в начальной части выходной характеристики, где она близка к прямолинейной (см. рис. 9.2).

Температурные погрешности тахогенератора обусловлены колебаниями температуры обмоток и полого ротора вследствие нагрева тахогенератора за счет происходящих в нем потерь или за счет теплоты, излучаемой расположенными вблизи приборами и механизмами. Для уменьшения температурных погрешностей полый ротор тахогенератора изготавливают из сплавов с малым температурным коэффициентом сопротивления так, чтобы колебания температуры нагрева ротора практически не вызывали изменения его активного сопротивления. Для уменьшения влияния температуры на активное сопротивление обмотки возбуждения последовательно с обмоткой включают терморезистор, сопротивление которого с изменением температуры изменяется, компенсируя изменение активного сопротивления обмотки возбуждения.

Частотные погрешности возникают при колебаниях частоты переменного тока в цепи обмотки возбуждения. Для уменьшения этих погрешностей применяют источники питания цепи возбуждения со стабилизацией частоты.

Остаточная ЭДС асинхронного тахогенератора наводится в генераторной обмотке при неподвижном роторе ($n = 0$).

Наличие остаточной ЭДС является основной причиной несимметрии выходной характеристики асинхронного тахогенератора. В идеальном тахогенераторе при неподвижном роторе ЭДС $E_r = 0$ [см. (9.7)], так как оси обмоток возбуждения и генераторной смещены в пространстве на 90 эл. град. Однако в реальном асинхронном тахогенераторе из-за технологических неточностей при изготовлении пространственный сдвиг осей обмоток отличается от 90 эл. град. Кроме того, возможны несимметрия магнитной цепи (разное магнитное сопротивление магнитной цепи машины по различным радиальным направлениям) и наличие емкостных связей между обмотками. Для уменьшения остаточной ЭДС тахогенераторы изготавливают только многополюсными ($2p \geq 4$), что компенсирует магнитную несимметрию, обмотки возбуждения и генераторную располагают на разных статорах (одну на внутреннем, а другую — на внешнем), при этом внутренний статор имеет конструкцию, допускающую его поворот

относительно внешнего. В процессе наладки внутренний статор тахогенератора поворачивают в ту или иную сторону, пока не найдут такое положение относительно внешнего статора, при котором остаточная ЭДС $E_0 = E_{\min}$, и закрепляют его в таком положении. Применяют специальные схемы включения обмоток с применением компенсирующих активных сопротивлений и емкостей. Однако полностью исключить остаточную ЭДС невозможно, и для асинхронных тахогенераторов она составляет $(25—100) \cdot 10^{-3}$ В. Наблюдаются также колебания остаточной ЭДС, что объясняется разными причинами, в том числе различной толщиной стенок стаканов ротора. Однако эти колебания невелики.

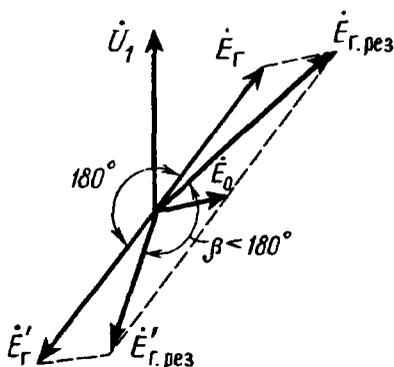


Рис. 9.3. Векторная диаграмма ЭДС асинхронного тахогенератора

Результирующую ЭДС асинхронного тахогенератора представим в виде суммы остаточной E_0 (не зависящей от частоты вращения) и генераторной ЭДС E_r (пропорциональной частоте вращения):

$$\dot{E}_{r\text{рез}} = \dot{E}_0 + \dot{E}_r. \quad (9.13)$$

Из построений, приведенных на векторной диаграмме (рис. 9.3), видно, что ЭДС $\dot{E}_{r\text{рез}}$ при вращении ротора в одну сторону отличается от ЭДС $\dot{E}'_{r\text{рез}}$ при вращении ротора в другую сторону по величине, а их фазовый сдвиг относительно друг друга β не равен 180° . Основное средство уменьшения несимметрии выходной характеристики — уменьшение остаточной ЭДС E_0 .

Асинхронный тахогенератор можно использовать в качестве датчика ускорений для получения сигнала, пропорционального ускорению вала dn/dt . Для этого обмотку возбуждения ОВ включают в сеть постоянного тока, при этом напряжение U_b должно быть таким, чтобы ток возбуждения I_b не превышал значений, допустимых по условиям нагрева обмотки. Постоянный ток I_b , проходящий по ОВ, создает МДС F_b , наводящую постоянный магнитный поток $\Phi_{\text{пост}}$, направленный по продольной оси $d-d$. В отличие от пульсирующего магнитного потока Φ_a , действующего по оси $d-d$ при включении обмотки возбуждения в сеть переменного тока (см рис. 9.1, а), поток $\Phi_{\text{пост}}$ не наводит в роторе трансформаторной ЭДС. Если ротор вращается с постоянной частотой ($n = \text{const}$; $dn/dt = 0$), то он пересекает силовые линии потока $\Phi_{\text{пост}}$ и в роторе наводится ЭДС вращения $E_{2\text{вр}}$, создающая ток $I_{2\text{вр}}$. Так как частота вращения постоянная, то ток $I_{2\text{вр}}$ — постоян-

ный и созданный этим током магнитный поток Φ_{2q} , направленный по поперечной оси машины, также будет постоянным, т. е. $d\Phi_q/dt = 0$. Поэтому поток Φ_{2q} , сцепленный с генераторной обмоткой w_r , не будет наводить в ней ЭДС, т. е.

$$e_r = -w_r (d\Phi_{2q}/dt) = 0. \quad (9.14)$$

Если частота вращения ротора переменна, т. е. ротор тахогенератора получил некоторое ускорение ($dn/dt \neq 0$), то ЭДС $E_{2вр}$, ток $I_{2вр}$ и поток Φ_{2q} , изменяются. При этом $d\Phi_{2q}/dt \neq 0$ и в генераторной обмотке поток Φ_{2q} наводит ЭДС, мгновенное значение которой

$$e_r = -w_r (d\Phi_{2q}/dt) \neq 0. \quad (9.15)$$

Таким образом, ЭДС генераторной обмотки E_r , а следовательно, напряжение на выходе датчика ускорений $U_{\text{выл}} \approx E_r$ пропорционально ускорению ($U_{\text{выл}} \sim dn/dt$). При изменениях знака ускорения меняется полярность напряжения $U_{\text{выл}}$.

Достоинства асинхронного тахогенератора: отсутствие скользящих контактов, что обеспечивает его эксплуатационную надежность и стабильность выходной характеристики; малоинерционность и небольшой момент сопротивления из-за незначительной массы ротора и отсутствия радиальных и аксиальных сил, действующих на ротор в процессе работы тахогенератора.

Недостатки асинхронного тахогенератора: нелинейность выходной характеристики; наличие остаточной ЭДС, а следовательно, несимметричность выходной характеристики; небольшая мощность на выходе; повышенные габаритные размеры и масса, которые в 2—3 раза больше, чем у тахогенераторов постоянного тока (см. § 9.4).

Несмотря на перечисленные недостатки, асинхронные тахогенераторы широко используются в устройствах автоматики, особенно в случаях повышенного требования к надежности этих устройств. В табл. 9.1 приведены технические данные некоторых типов асинхронных тахогенераторов.

Таблица 9.1

Тип тахогенератора	Параметры						
	n_{max} , об/мин	f_1 , Гц	c_{12} , В/(об/мин)	U_B , В	I_B , А	ΔU_A , %	G , мг
АТ 201	4000	500	0.0075	110	0.22	0.1	2,5
АТ 231	4000	500	0.0085	110	0.25	0.1	1,9
АТ-261	4000	400	0.0075	110	0.20	0.1	1,8
ТГ-4	6000	400	0.0100	110	0.30	2.5	0,3
ТГ-5А	9000	400	0.0110	115	0.06	2.5	0,3
ТД 1	2400	50	0.0080	110	0.15	1.5	3.0
ТД2	2400	50	0.0080	127	0.13	1.5	3,0

Примечание G — масса

Синхронные тахогенераторы. Синхронный тахогенератор — это синхронная машина весьма малой мощности, работающая в генераторном режиме. При вращении ротора 1, представляющего собой постоянный магнит (рис. 9.4), создаваемое им магнитное поле также вращается и пересекая обмотку статора 2, уложенную в пазы сердечника статора 3, наводит в ней ЭДС, действующее значение которой, E_r ,

$$E_r = 4,44 f_r w_r \Phi k_{\text{об1}}, \quad (9.16)$$

где w_r — число витков в обмотке фазы статора; f_r — частота ЭДС в этой обмотке, Гц,

$$f_r = pn/60. \quad (9.17)$$

Подставив (9.17) в (9.16), получим ЭДС

$$E_r = 4,44 (pn/60) w_r \Phi k_{\text{об1}} = kn, \quad (9.18)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Из (9.18) следует, что ЭДС синхронного тахогенератора прямо пропорциональна частоте вращения ротора. Однако выходная характеристика этого тахогенератора нелинейна. Это объясняется тем, что изменение частоты вращения ротора влияет не только на ЭДС E_r , но и на частоту этой ЭДС f_r [см. (9.17)] что ведет к изменению индуктивных сопротивлений обмотки статора и нагрузки. Нелинейность выходной характеристики $U_{\text{вых}} = f(n)$ затрудняет применение синхронных тахогенераторов в схемах автоматики.

Синхронные генераторы обычно применяют в качестве измерительных для контроля частоты вращения какого-либо вала. В этом случае к тахогенератору подключают вольтметр, шкала которого переградуирована в единицы частоты вращения. Можно применять синхронный тахогенератор с выпрямителем, т. е. с постоянным током в нагрузке. В этом случае нагрузка обладает только активным сопротивлением и нелинейность выходной характеристики уменьшается. Однако такой тахогенератор приобретает недостатки, ограничивающие его применение: выходное напряжение содержит переменную составляющую и тахогенератор оказывается нечувствительным к изменению направления вращения, так как при любом направлении вращения полярность выходного напряжения остается неизменной.

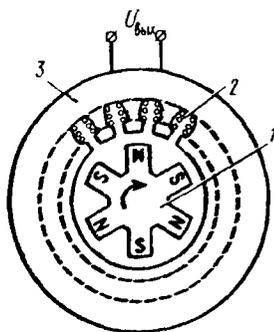


Рис. 9.4. Электромагнитная схема синхронного тахогенератора

9.3. Тахогенераторы постоянного тока

Тахогенератор постоянного тока — это машина постоянного тока с независимым возбуждением или возбуждением постоянными маг-

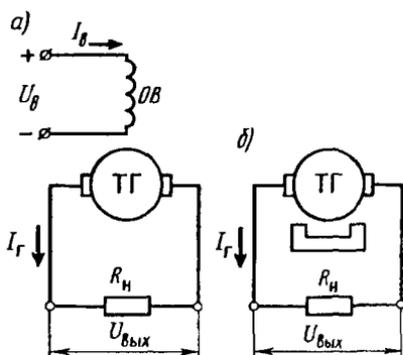


Рис. 9.5. Принципиальные схемы включения тахогенераторов постоянного тока

нитами, работающая в генераторном режиме. По конструкции он почти не отличается от ранее рассмотренных машин постоянного тока (см. § 6.2).

На рис. 9.5 показаны принципиальные схемы тахогенераторов постоянного тока с электромагнитным возбуждением (а) и возбуждением постоянными магнитами (б). В случае электромагнитного возбуждения обмотку возбуждения *ОВ* подключают к источнику постоянного тока (рис. 9.5, а). Тахогенератор возбуждается и если его якорь привести во вращение с частотой *n*, то на вы-

ходе генератора появится постоянное напряжение $U_{\text{вых}}$. Уравнение выходной характеристики тахогенератора имеет вид

$$U_{\text{вых}} = \frac{c_c \Phi_n n}{1 + r_a / R_n} - \frac{\Delta U_{\text{щ}}}{1 + r_a / R_n}, \quad (9.19)$$

где r_a — сопротивление обмотки якоря. Ом; R_n — внутреннее сопротивление прибора, подключенного к тахогенератору. Ом.

Если пренебречь падением напряжения в щеточном контакте $\Delta U_{\text{щ}}$, то

$$U_{\text{вых}} = \frac{c_c \Phi_n n}{(1 + r_a / R_n)} = c_t n. \quad (9.20)$$

Из (9.20) следует, что чем больше сопротивление прибора R_n , тем больше крутизна выходной характеристики c_U . Наибольшая крутизна у выходной характеристики, соответствующей режиму холостого хода тахогенератора, когда обмотка якоря разомкнута ($R_n = \infty$). С ростом тока нагрузки (уменьшением R_n) крутизна выходной характеристики уменьшается (рис. 9.6, а). У современных тахогенераторов постоянного тока $c_U = (6 \div 260) \cdot 10^{-3}$ В/(об/мин), что превышает крутизну асинхронных тахогенераторов.

Выходная характеристика тахогенератора постоянного тока [см. (9.20)] — прямая линия. Однако опыт показывает, что выходная характеристика прямолинейна только в начальной части (при малых относительных частотах вращения), а с ростом частоты вращения она становится криволинейной (рис. 9.6, а). Криволинейность характеристики усиливается при уменьшении сопротивления нагрузки R_n и увеличении частоты вращения n . Это объясня-

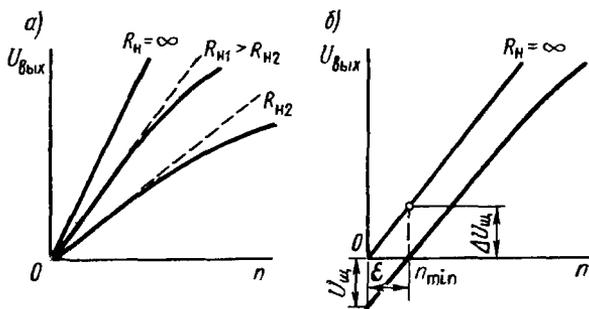


Рис. 9.6. Выходные характеристики тахогенераторов постоянного тока

ется размагничивающим действием реакции якоря в тахогенераторе. Для уменьшения криволинейности выходной характеристики не следует использовать тахогенератор на его предельных частотах вращения и применять в качестве нагрузки приборы с малым внутренним сопротивлением.

В реальных условиях существует падение напряжения в щеточном контакте $\Delta U_{щ}$, поэтому выходная характеристика тахогенератора выходит не из начала осей координат, а из точки на оси ординат, отстоящей от начала координат на

$$U_{щ} = -[\Delta U_{щ} / (1 - r_u / R_n)]. \quad (9.21)$$

Это приводит к появлению у тахогенераторов постоянного тока зоны нечувствительности $\epsilon = \pm n_{\min}$, в пределах которой он не создает на выходе напряжения (рис. 9.6, б). Для уменьшения зоны нечувствительности в тахогенераторах применяют щетки с небольшим значением $\Delta U_{щ}$, т. е. с малым сопротивлением (меднографитные или серебряно-графитные). В тахогенераторах высокой точности (прецизионных) используют щетки с серебряными или золотыми напайками.

На точность работы тахогенераторов значительно влияет правильная установка щеток на геометрической нейтрали. При смещении щеток с геометрической нейтрали в тахогенераторе появляется несимметрия выходной характеристики, т. е. вследствие нарушения (9.2) при одинаковой частоте вращения, но разных ее направлениях напряжения $U_{\text{вых}}$ неодинаковы. Ошибка из-за несимметрии в тахогенераторах постоянного тока составляет $\Delta u_{\text{сим}} = 1 \div 3\%$ [см. (9.3)].

Источником погрешности является также непостоянство магнитного потока обмотки возбуждения Φ_b . При электромагнитном возбуждении тахогенератора причиной этого может быть колебание напряжения U_b , подводимого к обмотке возбуждения, нагрев

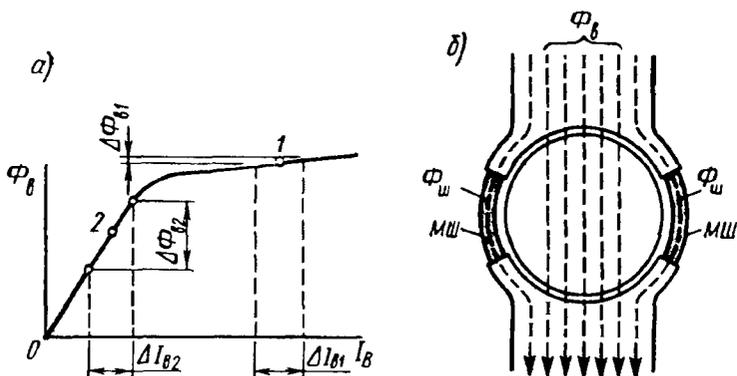


Рис. 9.7. Кривая намагничивания тахогенератора постоянного тока (а) и магнитопровод с магнитными шунтами (б)

этой обмотки. В обоих случаях изменяется ток возбуждения $I_{в}$, что ведет к изменению потока $\Phi_{в}$. Для уменьшения возможных колебаний потока $\Phi_{в}$ магнитную систему тахогенератора выполняют с сильным магнитным насыщением, т. е. рабочую точку 1 на кривой намагничивания принимают за «коленом» насыщения магнитной системы. Из построений рис. 9.7, а видно, что изменение тока возбуждения $I_{в}$ на $\Delta I_{в1}$ в зоне точки 1 вызывает изменение потока возбуждения на $\Delta \Phi_{в1}$, значение изменений здесь намного меньше, чем в зоне точки 2 , лежащей на прямолинейном участке кривой намагничивания, расположенном до «колена» насыщения ($\Delta \Phi_{в1} \ll \Delta \Phi_{в2}$). Сильное магнитное насыщение магнитной цепи тахогенератора не всегда целесообразно, потому что увеличивается объем обмотки возбуждения, а следовательно, габаритные размеры тахогенератора. В тахогенераторах с ненасыщенной магнитной системой для ограничения колебаний потока возбуждения $\Phi_{в}$ последовательно в цепь обмотки возбуждения включают терморезистор, компенсирующий изменение сопротивления обмотки при колебаниях температуры, или применяют магнитные шунты МШ (рис. 9.7, б), изготовленные из сплава, изменяющего свое магнитное сопротивление при изменении температуры нагрева. Например, при нагреве обмотки возбуждения ее сопротивление увеличивается, ток $I_{в}$ и поток $\Phi_{в}$ уменьшаются. Но при этом магнитное сопротивление шунтов увеличивается, что уменьшает поток $\Phi_{ш}$ через шунты и увеличивает поток $\Phi_{в}$ через полюс и якорь на величину, компенсирующую его уменьшение от изменения тока возбуждения. При снижении температуры процессы идут в обратном направлении. В итоге происходят лишь незначительные колебания потока возбуждения.

Все причины, вызывающие отклонение выходной характеристики тахогенератора от прямолинейной, ведут к амплитудной погрешности. Тахогенераторы постоянного тока имеют амплитудную погрешность от 0,5 до 3%, см. (9.10). В тахогенераторах постоянного тока возможна *пульсация выходного напряжения*, обусловленная рядом причин: зубчатой поверхностью сердечника якоря; неравномерностью воздушного зазора или неодинаковой магнитной проводимостью сердечника якоря по разным радиальным направлениям; вибрацией щеток и замыканием секций обмотки якоря в процессе коммутации; небольшим количеством секций в обмотке якоря из-за малых габаритных размеров машины (см. § 6.1). Пульсации напряжения могут вносить помехи в работу автоматических устройств, элементом которых являются тахогенераторы. Пульсации напряжения можно ослабить за счет более качественной технологии изготовления тахогенератора с применением веерной сборки листов сердечника якоря (листы укладывают в пакет со сдвигом на одно зубцовое деление), а также подключением сглаживающего фильтра на выход тахогенератора. Однако полностью избавиться от пульсаций не удастся. Амплитуды пульсаций выходного напряжения тахогенераторов постоянного тока составляют 0,1—3% от среднего значения выходного напряжения.

Достоинства тахогенераторов постоянного тока по сравнению с асинхронными тахогенераторами: меньшие габаритные размеры и масса (в 2—3 раза) при большей выходной мощности; отсутствие фазовой погрешности; возможно возбуждение постоянными магнитами, что позволяет обойтись без источника питания для цепи возбуждения.

Наряду с этим тахогенераторы постоянного тока имеют недостатки, ограничивающие их применение: наличие скользящего контакта между щетками и коллектором, что приводит к снижению надежности тахогенератора и к нестабильности выходной характеристики; наличие зоны нечувствительности; пульсация выходного напряжения; помехи радиоприему, для подавления которых в некоторых случаях приходится применять специальные меры (см. § 6.6).

Таким образом, любой вид тахогенератора имеет свои достоинства и недостатки. Поэтому при выборе тахогенератора необходимо исходить из конкретных условий его работы и требований, предъявляемых к тахогенератору со стороны автоматического устройства, для которого он предназначен.

В табл. 9.2 приведены технические данные некоторых тахогенераторов постоянного тока, изготавливаемых серийно отечественной промышленностью.

Таблица 9.2

Тип	Параметры				
	n_{max} , об/мин	c_{U_s} В/(об/мин)	I_r , А	U_b , В	G , кг
ТД-101	1500	0.021	0,10	110	0,70
ТД-103	1500	0.100	0.10	110	0.70
ТГ-1	1100	0.100	0,01	27	1.85
ТГ-3	4000	0.015	0,10	27	0,50
ТД-201	1100	0.13	0.20	110	—
ТД-103ПМ	1000	0.100	0,10	—	—
ТД-201ПМ	1000	0.260	0.20	—	—
ТТП-1	7000	0.006	—	—	0,15

Примечание: Тахогенераторы типов ТД-103ПМ, ТД-201ПМ, ТТП-1 выполнены с постоянными магнитами.

Контрольные вопросы

1. Объясните назначение тахогенераторов и перечислите предъявляемые к ним требования
2. Почему частота выходного напряжения асинхронного тахогенератора не зависит от частоты вращения?
3. Объясните причины погрешностей асинхронных тахогенераторов
4. Какова причина появления зоны нечувствительности в тахогенераторе постоянного тока?

Глава 10

Электрические машины синхронной связи

10.1. Общие сведения

В системах автоматического контроля и регулирования иногда необходимо передавать на расстояние заданный угол поворота вала контролируемого или регулируемого объекта или получать информацию о угловом положении вала этого объекта. Для этой цели применяются системы дистанционной передачи угла на электрических машинах синхронной связи, называемых *сельсинами*. Сельсины относятся к информационным электрическим машинам, так как преобразуют угол поворота в электрический сигнал и, наоборот, электрический сигнал в угловое перемещение.

На рис. 10.1 показаны структурные схемы систем дистанционной передачи угла поворота вала с помощью сельсина-датчика *СД* и сельсина-приемника *СП*, соединенных линией связи *ЛС*. При повороте вала *В* на угол α (рис. 10.1, *а*) сельсином-датчиком вырабатывается соответствующий этому углу сигнал, который передается по линии связи на сельсин-приемник *СП*, где он преобразуется в угловое перемещение ротора *СП* на угол α . Рассмотренная система называется индикаторной, так как вал сельсина-приемника поворачивает стрелку индикатора *И*, отмечающую на шкале угол поворота вала *В*. Индикаторная система только передает информацию об угловом положении контролируемого вала.

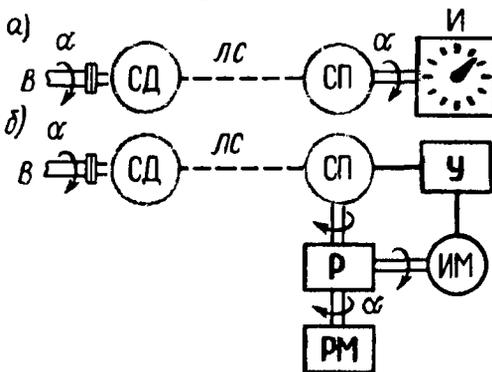


Рис. 10.1. Структурные схемы дистанционных систем передачи угла поворота на сельсинах: индикаторная (*а*), трансформаторная (*б*)

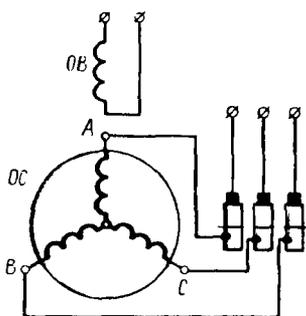


Рис. 10.2. Схема однофазного сельсина

Если требуется воспроизвести угол поворота α вала B на каком-либо рабочем механизме, то система дополняется усилителем мощности $У$ и исполнительным двигателем $ИМ$ (рис. 10.1, б), который через редуктор $Р$ создает на валу рабочего механизма $РМ$ вращающий момент, достаточный для поворота вала на угол α . Одновременно поворачивается ротор сельсина-приемника $СП$ на угол α . Такая система дистанционной передачи называется *трансформаторной*.

Сельсины применяют также в системах электрического вала, осуществляющих синхронное вращение валов нескольких механизмов, находящихся на расстоянии друг от друга.

Наибольшее применение в системах дистанционной передачи угла получили однофазные сельсины. Такой сельсин состоит из неподвижного статора и вращающегося ротора. На статоре однофазного сельсина (рис. 10.2) расположена однофазная обмотка возбуждения OB , а на роторе — трехфазная обмотка синхронизации OC , соединенная звездой. Для электрической связи обмотки ротора с внешней цепью используются контактные кольца и щетки. Кольца закреплены на валу сельсина и изолированы друг от друга.

Между кольцами и щетками осуществляется скользящий контакт, так как кольца вращаются вместе с ротором, а щетки неподвижны. Помимо рассмотренного сельсина, называемого контактным, существуют бесконтактные сельсины, у которых все обмотки расположены на статоре, следовательно, у них нет контактных колец и щеток (см. § 10.4).

Сельсин — индукционная электрическая машина, так как ее принцип действия основан на трансформаторной связи между обмотками на статоре и роторе: напряжение, поданное на одну из обмоток, передается на другую обмотку за счет индуктивной связи между ними.

■ 10.2. Индикаторная система дистанционной передачи угла

Индикаторная система дистанционной передачи угла состоит из одинаковых сельсина-датчика $СД$ и сельсина-приемника $СП$, соединенных линией связи (рис. 10.3, а).

Пространственное положение ротора сельсина-датчика определяется углом α_d , ротора сельсина-приемника — углом α_n . Если положе-

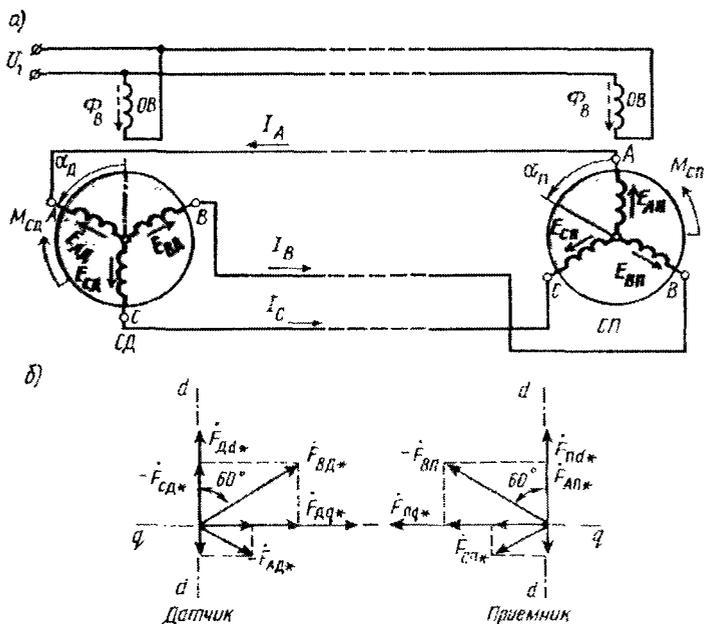


Рис. 10.3. Схемы и векторные диаграммы индикаторной системы дистанционной передачи угла

ние ротора $СД$ и $СП$ не одинаково ($\alpha_d \neq \alpha_n$), то это значит, что между ними имеется угол рассогласования

$$\theta = \alpha_d - \alpha_n. \quad (10.1)$$

При включении в сеть обмоток возбуждения сельсинов $СД$ и $СП$ переменные токи возбуждения создадут пульсирующие во времени МДС и магнитные потоки Φ_B , которые, сцепляясь с обмотками синхронизации, наводят в них ЭДС синхронизации E_A , E_B и E_C . Если какая-либо из обмоток фазы синхронизации, например фазы A , занимает такое пространственное положение, что ее ось совпадает с осью обмотки возбуждения, то ЭДС обмотки этой фазы синхронизации максимальна. В:

$$E_{A_{\max}} = E_0 = 4,44 f_1 w_\phi k_{\text{об.}\phi} \Phi_B, \quad (10.2)$$

где w_ϕ и $k_{\text{об.}\phi}$ — число витков и обмоточный коэффициент обмотки фазы синхронизации.

Если оси обмотки фазы синхронизации и обмотки возбуждения смещены относительно друг друга на угол α , то ЭДС обмотки этой фазы, В

$$E_A = E_0 \cos \alpha. \quad (10.3)$$

Так как в сельсине фазы обмотки синхронизации смещены в пространстве относительно друг друга на угол 120° , ЭДС обмоток этих фаз равны:

$$\begin{aligned} E_A &= E_0 \cos \alpha; \\ E_B &= E_0 \cos(\alpha - 120^\circ) = E_0 \cos \beta; \\ E_C &= E_0 \cos(\alpha - 240^\circ) = E_0 \cos \gamma, \end{aligned} \quad (10.4)$$

где α — угол поворота ротора сельсина относительно положения, при котором ось обмотки A совпадает с осью обмотки возбуждения; $\beta = \alpha - 120^\circ$; $\gamma = \alpha - 240^\circ$.

Если роторы сельсинов $СД$ и $СП$ занимают одинаковые положения относительно собственных обмоток возбуждения ($\alpha_d = \alpha_n$), то в обмотках фаз синхронизации этих сельсинов наводятся одинаковые ЭДС: $E_d = E_{дП}$; $E_{вд} = E_{вП}$; $E_{сд} = E_{сп}$. В этом случае разность ЭДС в цепи одноименных фаз обмотки синхронизации равна нулю, ток в цепи синхронизации (линии связи) отсутствует ($I_A = 0$, $I_B = 0$, $I_C = 0$) и система находится в состоянии равновесия.

Если же ротор сельсина-датчика повернуть на угол α_d , а ротор сельсина-приемника оставить в прежнем положении ($\alpha_n = 0$), то появится угол рассогласования $\theta = \alpha_d - \alpha_n = \alpha_d$ и нарушится равновесие ЭДС в цепи синхронизации, т. е. $E_{дд} \neq E_{дП}$, $E_{вд} \neq E_{вП}$, $E_{сд} \neq E_{сп}$. Так как одноименные фазы обмотки синхронизации датчика и приемника включены встречно, то в цепях этих обмоток появится результирующая ЭДС ΔE , равная разности ЭДС одноименных обмоток фаз синхронизации. С учетом (10.4) результирующая ЭДС соответственно в каждой из фазных цепей синхронизации:

$$\begin{aligned} \Delta E_A &= E_{дд} - E_{дП} = E_0 \cos \alpha_d - E_0 \cos 0^\circ = E_0 (\cos \alpha_d - 1); \\ \Delta E_B &= E_{вд} - E_{вП} = E_0 \cos \beta - E_0 \cos(-120^\circ) = \\ &= E_0 (\cos \beta + \frac{1}{2}); \\ \Delta E_C &= E_{сд} - E_{сп} = E_0 \cos \gamma - E_0 \cos(-240^\circ) = \\ &= E_0 (\cos \gamma + \frac{1}{2}). \end{aligned} \quad (10.5)$$

Под действием результирующих ЭДС в обмотках синхронизации датчика и приемника появятся уравнительные токи:

$$\begin{aligned} I_A &= \Delta E_A / Z; \\ I_B &= \Delta E_B / Z; \\ I_C &= \Delta E_C / Z, \end{aligned} \quad (10.6)$$

где Z — суммарное сопротивление току синхронизации:

$$Z = Z_d + Z_n + Z_{л}. \quad (10.7)$$

Z_d и Z_n — сопротивления фазы обмоток синхронизации датчика и приемника, Ом; $Z_{л}$ — сопротивление соединительного провода линии связи, Ом.

Эти токи, проходя по виткам фаз обмоток синхронизации, создают магнитодвижущие силы в датчике ($F_{АД}$, $F_{ВД}$, $F_{СД}$) и приемнике ($F_{АП}$, $F_{ВП}$, $F_{СП}$). Если ток I_A проходит по обмотке фазы A датчика от начала обмотки к нулевой точке, то в обмотке фазы A приемника этот ток проходит от нулевой точки к началу обмотки. Это же касается токов в обмотках фазы B и C . Учитывая это, значения МДС всех фаз синхронизации приемника по отношению к МДС фаз синхронизации датчика принимают с противоположным знаком. Таким образом, МДС для обмоток фаз синхронизации:

$$\begin{aligned} F_{АД} &= -F_{АП} = I_A w_\phi; \\ F_{ВД} &= -F_{ВП} = I_B w_\phi; \\ F_{СД} &= -F_{СП} = I_C w_\phi. \end{aligned} \quad (10.8)$$

Учитывая (10.5) и (10.6), запишем

$$\begin{aligned} F_{АД} &= -F_{АП} = F_0 (\cos \alpha_a - 1); \\ F_{ВД} &= -F_{ВП} = F_0 (\cos \beta + \frac{1}{2}); \\ F_{СД} &= -F_{СП} = F_0 (\cos \gamma + \frac{1}{2}), \end{aligned} \quad (10.9)$$

где

$$F_0 = E_0 w_\phi / Z. \quad (10.10)$$

Результирующая МДС обмотки синхронизации сельсина-датчика и сельсина-приемника определяется выражениями

$$F_{Д} = \sqrt{F_{Дd}^2 + F_{Дq}^2}; \quad (10.11)$$

$$F_{П} = \sqrt{F_{Пd}^2 + F_{Пq}^2}, \quad (10.12)$$

где $F_{Дd}$ и $F_{Пd}$ — сумма проекций фазных МДС на продольную ось d — d , т. е. ось обмотки возбуждения; $F_{Дq}$ и $F_{Пq}$ — сумма проекций фазных МДС на поперечную ось q — q , перпендикулярную оси обмотки возбуждения.

Допустим, что ротор сельсина-датчика повернули на угол $\alpha_a = 60^\circ$ против часовой стрелки, при этом угол рассогласования в системе передачи $\theta = \alpha_a - \alpha_n = 60^\circ - 0^\circ = 60^\circ$. Тогда МДС обмоток фаз синхронизации датчика и приемника в соответствии с (10.9) и учетом того, что $\beta = \alpha_a - 120^\circ = -60^\circ$ и $\gamma = \alpha_a - 240^\circ = -180^\circ$, равны:

$$\begin{aligned} F_{АД} &= F_0 (\cos 60^\circ - 1) = -\frac{1}{2} F_0; \quad F_{АП} = \frac{1}{2} F_0; \\ F_{ВД} &= F_0 \left[\cos(-60^\circ) + \frac{1}{2} \right] = F_0; \quad F_{ВП} = -F_0; \\ F_{СД} &= F_0 \left[\cos(-180^\circ) + \frac{1}{2} \right] = -\frac{1}{2} F_0; \quad F_{СП} = \frac{1}{2} F_0. \end{aligned} \quad (10.13)$$

Переходя к относительным значениям МДС $F_* = F/F_0$, получим

$$\begin{aligned}
 F_{Ad^*} &= -1/2; \quad F_{Ap^*} = 1/2; \\
 F_{Bd^*} &= 1; \quad F_{Bp^*} = -1; \\
 F_{Cd^*} &= -1/2; \quad F_{Cp^*} = 1/2.
 \end{aligned}
 \tag{10.14}$$

За положительное направление вектора МДС обмотки фазы синхронизации при построении векторной диаграммы МДС примем направление от нулевой точки к началу обмотки фазы, а за отрицательное — от начала обмотки фазы к нулевой точке. На рис. 10.3, б показано построение результирующих векторов МДС сельсинов датчика и приемника по продольной $d-d$ и поперечной $q-q$ осям. Эти МДС соответственно равны:

$$\begin{aligned}
 F_{d^*} &= (-F_{Cd^*}) + F_{Bd^*} \cos 60^\circ - (-F_{Ad^*} \cos 60^\circ) = \\
 &= \frac{1}{2} + 1 \cdot \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = 0,75; \\
 F_{q^*} &= F_{Ap^*} + (-F_{Bp^*} \cos 60^\circ) - F_{Cp^*} \cos 60^\circ = \\
 &= \frac{1}{2} + 1 \cdot \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = 0,75; \\
 F_{d^*} &= (-F_{Ad^*} \cos 30^\circ) + F_{Bd^*} \cos 30^\circ = \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} + 1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 1,29; \\
 F_{q^*} &= F_{Cp^*} \cos 30^\circ + (-F_{Bp^*} \cos 30^\circ) = \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} + 1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 1,29.
 \end{aligned}$$

Продольные составляющие МДС F_{d^*} и F_{q^*} направлены навстречу магнитным потокам возбуждения датчика и приемника. Но они не оказывают заметного влияния на работу сельсинов, так как при небольших углах рассогласования θ , которые обычно имеют место в реальных условиях работы индикаторных систем (не более нескольких градусов), F_d в 8—10 раз меньше F_q . Поперечные составляющие МДС F_{d^*} и F_{q^*} взаимодействуют с магнитными потоками возбуждения и создают в датчике и приемнике вращающие синхронизирующие моменты $M_{сд}$ и $M_{сп}$.

Индикаторная система дистанционной передачи угла является *самосинхронизирующейся*, т. е. при нарушении равновесия ($\theta \neq 0$) синхронизирующие моменты датчика и приемника направлены так, чтобы вернуть систему в состояние равновесия ($\theta = 0$), когда роторы датчика и приемника займут одинаковые положения относительно своих статоров.

Таким образом, синхронизирующий момент датчика $M_{сд}$ направлен в сторону, противоположную заданному углу поворота (в рассматриваемом примере — по часовой стрелке), а синхронизирующий

момент на роторе приемника $M_{с.п}$ — в сторону заданного на датчике угла α_d и стремится повернуть ротор приемника на угол $\alpha_n = \alpha_d$. Если роторы датчика и приемника, имеющие рассогласование θ , одновременно растормозить, то каждый из них повернется на угол, равный половине угла рассогласования ($\theta/2$), но в разных направлениях. После этого датчик и приемник вновь окажутся согласованными. О встречном направлении синхронизирующих моментов $M_{с.д}$ и $M_{с.п}$ свидетельствует то, что векторы магнитодвижущих сил F_{dq} и F_{pq} направлены в разные стороны (см. рис. 10.3, б).

Синхронизирующий момент датчика $M_{с.д}$ не влияет на состояние индикаторной системы, поскольку ротор датчика жестко связан с механизмом, задающим угол поворота α_d . Под действием синхронизирующего момента приемника $M_{с.п}$ ротор приемника поворачивается на заданный угол. Для придания системе способности самосинхронизации в пределах полного оборота сельсины выполняются двухполюсными. В этом случае электрический угол поворота равен геометрическому. Например, если применить четырехполюсные сельсины, то заданному датчиком рассогласованию соответствуют два устойчивых положения ротора сельсина-приемника — одно в пределах одной половины оборота, а другое в пределах другой половины оборота.

Синхронизирующий момент сельсина-приемника

$$M_{с.п} = c\Phi_{в.п} F_{nq} \sin \varphi_2, \quad (10.15)$$

где угол сдвига фаз между ЭДС и током в обмотке фазы синхронизации

$$\varphi_2 = \arcsin(r_\phi / z_\phi), \quad (10.16)$$

z_ϕ , r_ϕ — соответственно полное и активное сопротивления обмотки синхронизации.

Магнитодвижущая сила приемника по поперечной оси F_{nq} — функция угла рассогласования θ , поэтому синхронизирующий момент $M_{с.п}$ зависит также от угла рассогласования:

$$M_{с.п} = M_{с.макс} \sin \theta, \quad (10.17)$$

где $M_{с.макс}$ — максимальный синхронизирующий момент сельсина-приемника, соответствующий углу рассогласования $\theta = 90^\circ$.

Таким образом, при изменении угла рассогласования от 0° до 360° синхронизирующий момент изменяется по синусоидальному закону (рис. 10.4, а). При $\theta = 90^\circ$ и $\theta = 270^\circ$ синхронизирующий момент соответственно равен $M_{с.макс}$ и $-M_{с.макс}$. При $\theta = 0^\circ$ и $\theta = 180^\circ$ синхронизирующий момент равен нулю, т. е. индикаторная система находится в состоянии равновесия. Однако устойчивое равновесие будет только при $\theta = 0^\circ$, так как при повороте ротора приемника в ту или иную сторону от устойчивого положения ротор возвращается в исходное положение. При $\theta = 180^\circ$ равновесие системы неустойчиво, так при малейшем откло-

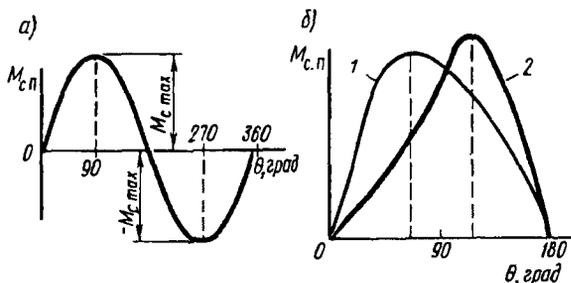


Рис. 10.4. Графики зависимости синхронизирующего момента сельсина от угла рассогласования

нении ротора от этого положения возникает синхронизирующий момент, стремящийся повернуть ротор на 180° , т. е. в положение, соответствующее $\theta = 0^\circ$.

Практическое исследование сельсинтов показывает, что синусоидальная зависимость синхронизирующего момента от угла рассогласования (10.17) справедлива лишь при малых значениях угла рассогласования $\theta \leq 15^\circ$. Объясняется это тем, что при больших значениях θ продольная составляющая МДС $F_{нд}$ возрастает настолько, что оказывает заметное размагничивающее влияние на поток возбуждения $\Phi_{вп}$. Кроме того, на форму графика $M_{с.п} = f(\theta)$ влияет и конструктивное исполнение сельсина. На рис. 10.4, б) приведены наиболее характерные графики $M_{с.п} = f(\theta)$ для сельсинтов с явно выраженными полюсами на статоре или роторе (кривая 1) (см. § 10.4) и для сельсинтов с неявно выраженными полюсами (кривая 2). Сравнивая их, приходим к выводу, что для индикаторной системы дистанционной передачи угла целесообразно применять сельсинты с явно выраженными полюсами, у которых синхронизирующий момент при углах рассогласования $\theta \leq 80^\circ$ (кривая 1) больше, чем у неявнополюсных сельсинтов (график 2).

Индикаторная система передачи угла работает в двух режимах — статическом и динамическом. Статический режим — это работа системы при повороте роторов сельсинтов на некоторый угол. Основное требование к индикаторной системе в статическом режиме — максимальная точность отработки сельсином-приемником заданного угла поворота. Индикаторная система дистанционной передачи угла работает таким образом, что одновременно с поворотом ротора сельсина-датчика происходит поворот ротора сельсина-приемника. Однако при заданном угле поворота α_d ротор сельсина-приемника поворачивается на угол α_n , который несколько меньше α_d . Следовательно, система работает с некоторой ошибкой — углом рассогласования $\theta = \alpha_d - \alpha_n$. Величина ошибки зависит от значения противодействующего момента

$M_{пр}$, который воздействует на ротор приемника в процессе его поворота и создается суммой двух составляющих:

$$M_{пр} = M_n + M_{тр}, \quad (10.18)$$

где M_n — полезный нагрузочный момент со стороны устройства, вращаемого сельсином-приемником; если стрелка индикатора закреплена непосредственно на валу приемника, то $M_n = 0$; $M_{тр}$ — момент трения, обусловленный силами трения в подшипниках сельсина и трением щеток о контактные кольца.

При большом моменте $M_{пр}$ ошибка индикаторной системы оказывается значительной, поэтому применение индикаторных систем для привода вала рабочих механизмов, создающих значительный нагрузочный момент, недопустимо.

В реальных условиях работы индикаторных систем основное влияние на точность обработки заданного угла поворота оказывает момент трения $M_{тр}$, значение которого определяется механическими показателями сельсина-приемника, т. е. $M_{пр} \approx M_{тр}$.

Точность индикаторной системы оценивается *удельным синхронизирующим моментом* сельсина-приемника, т. е. синхронизирующим моментом, приходящимся на один градус угла рассогласования, $H \cdot \text{м/град}$:

$$M_{уд} = M_{с\max} \sin 1^\circ = 0,0175M_{с\max}. \quad (10.19)$$

Чем больше крутизна графика $M_{сн} = f(\theta)$ в начальной его части, тем больше удельный синхронизирующий момент сельсина-приемника. Удельный синхронизирующий момент $M_{уд}$ определяет синхронизирующую способность сельсина-приемника, т. е. чем больше $M_{уд}$, тем меньше ошибка рассогласования системы. На рис. 10.5 показаны начальные участки графиков $M_{сн} = f(\theta)$ двух сельсин-приемников с разными удельными синхронизирующими моментами $M_{уд1} > M_{уд2}$, к роторам сельсинов приложены одинаковые моменты $M_{пр}$. Из выполненных построений видно, что ошибка θ_1 сельсина с большим $M_{уд}$ (график 1) почти в 2 раза меньше ошибки θ_2 сельсина с меньшим $M_{уд}$ (график 2).

В некоторых случаях к одному сельсину-датчику подключают параллельно несколько сельсинов-приемников. В этом случае удельный синхронизирующий момент каждого из N параллельно включенных сельсинов-приемников уменьшается по сравнению с удельным синхронизирующим моментом $M_{уд1}$ сельсина-

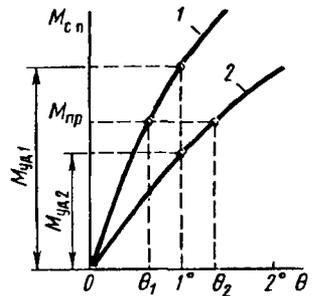


Рис. 10.5. К понятию об удельном синхронизирующем моменте

приемника, работающего по схеме «приемник—датчик».

$$M_{\text{уд}N} = M_{\text{уд}1} / [0,5(N + 1)]. \quad (10.20)$$

Таким образом, включение нескольких приемников на один датчик снижает точность индикаторной системы.

Количественной оценкой точности сельсина-приемника в статическом режиме работы индикаторной системы является *погрешность угла рассогласования*, град,

$$\Delta\theta = 0,5(\theta_{1\text{max}} + \theta_{2\text{max}}), \quad (10.21)$$

где $\theta_{1\text{max}}$ и $\theta_{2\text{max}}$ — максимальные положительное и отрицательное отклонения положений ротора сельсина-приемника относительно углов, задаваемых датчиком при его повороте на 360° по часовой стрелке, а затем против часовой стрелки.

Погрешность сельсинов-приемников составляет от $\pm 0,5$ до $\pm 2,5^\circ$. Еще один важный параметр сельсина-приемника в статическом режиме работы — *время успокоения*, т. е. время, в течение которого успокаивается ротор приемника после рассогласования индикаторной системы на $\pm 179^\circ$. Для ограничения времени успокоения и предотвращения самопроизвольного вращения ротора при резких рассогласованиях системы сельсины-приемники снабжаются *демпферами*, которые бывают электрическими и механическими. Электрический демпфер выполняется в виде короткозамкнутого витка ДЮ на явнополюсном роторе, ось которого расположена перпендикулярно оси обмотки возбуждения (см. рис. 10.8, б). При колебаниях ротора в этом витке наводится ЭДС и возникает ток, который взаимодействует с потоком возбуждения и создает на роторе момент, противодействующий качаниям ротора. Механические демпферы выполняются чаще всего в виде маховика, насаженного на вал сельсина-приемника, что повышает момент инерции ротора и ограничивает качания ротора.

Динамический режим — это режим непрерывного вращения роторов сельсинов. Особенность работы сельсинов в этом режиме состоит в том, что в процессе вращения обмотка ротора вращается в магнитном поле и в ней наводится ЭДС вращения. Создавая свои токи в цепи синхронизации сельсинов, эта ЭДС снижает удельный синхронизирующий момент и точность сельсина-приемника по сравнению с работой в статическом режиме.

Некоторые особенности работы индикаторной системы дистанционной передачи:

если поменять местами любую пару проводов, присоединяемых к фазам обмотки синхронизации сельсина-приемника, то направление поворота ротора приемника при отработке заданного угла станет противоположным, т. е. при задании на датчике угла в направлении часовой стрелки он будет воспроизведен приемником в направлении против часовой стрелки;

если на одном из сельсинов, например у приемника, поменять местами провода, присоединяемые к обмотке возбуждения, то фаза тока в этой обмотке изменится на 180° . В итоге система будет работать с постоянным рассогласованием положений роторов датчика и приемника на 180° , т. е. согласованное состояние системы будет соответствовать углу $\theta = 180^\circ$.

■ 10.3. Трансформаторная система дистанционной передачи угла

Трансформаторная система дистанционной передачи угла используется для передачи угла поворота на вал рабочего механизма, когда необходим значительный вращающий момент. Основные элементы трансформаторной системы (рис. 10.6): сельсин-датчик *СД*, сельсин-приемник *СП*, усилитель мощности *У*, исполнительный двигатель *ИМ* и редуктор *Р*, предназначенный для редуциции частоты вращения и усиления вращающего момента. Усилитель, мощности *У* используется для усиления мощности сигнала на выходе сельсина приемника до уровня, достаточного для приведения в действие исполнительного двигателя *ИМ*. Трансформаторная система передачи — следящая система с обратной связью по положению вала регулирующего органа рабочего механизма *РО*. Редуктор *Р* системы имеет два выхода: один присоединяется к валу рабочего механизма, другой — к валу сельсина-приемника.

Рассмотрим принцип работы трансформаторной системы. При включении в сеть обмотки возбуждения сельсина-датчика *ОВД* пульсирующий магнитный поток возбуждения наводит в фазах обмотки синхронизации электродвижущие силы, величина которых зависит от

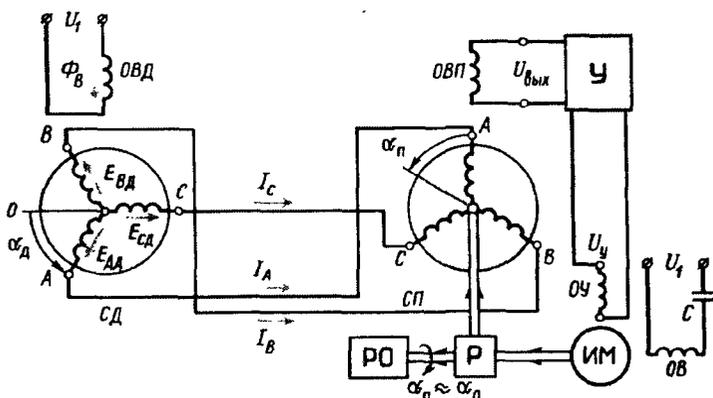


Рис. 10.6. Схема трансформаторной системы дистанционной передачи угла

угла поворота ротора датчика α_d относительно продольной оси. Согласованным положением роторов датчика и приемника в трансформаторной системе считают положение, когда одноименные фазы обмотки синхронизации смещены относительно друг друга на 90° . Поэтому (см. рис. 10.6) отсчет угла α_d в датчике ведется от оси, перпендикулярной оси обмотки возбуждения. Учитывая это, ЭДС фазы обмоток синхронизации датчика

$$\begin{aligned} E_{A_d} &= E_0 \cos(\alpha_d + 90^\circ) = -E_0 \sin \alpha_d; \\ E_{B_d} &= E_0 \cos(\alpha_d - 120^\circ + 90^\circ) = E_0 \cos(\alpha_d - 30^\circ); \\ E_{C_d} &= E_0 \cos(\alpha_d - 240^\circ + 90^\circ) = E_0 \cos(\alpha_d - 150^\circ). \end{aligned} \quad (10.22)$$

Электродвижущие силы создают токи в цепи синхронизации

$$\left. \begin{aligned} I_A &= E_{A_d}/Z = (-E_0 \sin \alpha_d)/Z; \\ I_B &= E_{B_d}/Z = [E_0 \cos(\alpha_d - 30^\circ)]/Z; \\ I_C &= E_{C_d}/Z = [E_0 \cos(\alpha_d - 150^\circ)]/Z. \end{aligned} \right\} \quad (10.23)$$

В трансформаторной системе токи синхронизации создаются только электродвижущими силами, наведенными в датчике, а не разностью ЭДС, как в индикаторной системе [см. (10.6)]. Токи синхронизации, проходя по соответствующим обмоткам фаз сельсина-приемника, создают пульсирующие МДС, значения которых принимаем со знаком минус [см. (10.8)]:

$$\left. \begin{aligned} F_{A_{\Pi}} &= F_0 \sin \alpha_d; \\ F_{B_{\Pi}} &= -F_0 \cos(\alpha_d - 30^\circ); \\ F_{C_{\Pi}} &= -F_0 \cos(\alpha_d - 150^\circ), \end{aligned} \right\} \quad (10.24)$$

где $F_0 = E_0 w_\Phi / Z$.

Результирующая МДС синхронизации по продольной оси (рис. 10.7, а) F_{nd} создает пульсирующий магнитный поток по продольной

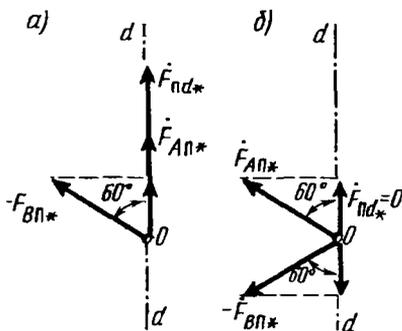


Рис. 10.7. Диаграммы МДС сельсина-приемника трансформаторной системы

оси Φ_{nd} , который наводит в обмотке возбуждения приемника ОВП ЭДС

$$E_{\text{вых}} = E_{\text{max}} \sin \alpha_d, \quad (10.25)$$

где E_{max} — действующее значение ЭДС, наводимой в обмотке возбуждения приемника при заданном угле поворота на сельсина-датчике $\alpha_d = 90^\circ$ и положении ротора приемника, при котором ось обмотки фазы синхронизации A расположена по оси обмотки возбуждения.

Обмотка возбуждения приемника в трансформаторной системе выполняет функцию генераторной обмотки.

Сигнал напряжения на выходе приемника $U_{\text{вых}} \approx E_{\text{вых}}$ поступает на вход усилителя мощности $У$, на выход которого включена обмотка управления $ОУ$ исполнительного двигателя $М$. При этом ротор двигателя приходит во вращение, которое через понижающий редуктор $Р$ передается, на вал рабочего механизма $РО$ и на ротор сельсина-приемника $СП$. По мере отработки заданного угла α_d МДС синхронизации по продольной оси F_{nd} постепенно уменьшается, следовательно, уменьшается напряжение сигнала $U_{\text{вых}}$. После того как ротор приемника будет повернут на угол $\alpha_n \approx \alpha_d$, выходной сигнал напряжения уменьшится до $U_{\text{вых}} \approx 0$ и трансформаторная система придет в равновесие. Для пояснения обратимся к рис. 10.6 и 10.7. Допустим, что на сельсине-датчике $СД$ задан угол поворота $\alpha_d = 60^\circ$ против часовой стрелки, тогда МДС фазы обмотки синхронизации приемника равны

$$F_{\text{АП}} = F_0 \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} F_0;$$

$$F_{\text{ВП}} = -F_0 \cos(60^\circ - 30^\circ) = -\frac{\sqrt{3}}{2} F_0;$$

$$F_{\text{СП}} = -F_0 \cos(60^\circ - 150^\circ) = 0.$$

Переходя к относительным значениям МДС, запишем

$$F_{\text{АП}^*} = \frac{\sqrt{3}}{2}; \quad F_{\text{ВП}^*} = -\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad F_{\text{СП}^*} = 0.$$

Из диаграммы МДС (рис. 10.7, а) получим относительное значение результирующей МДС обмотки синхронизации приемника по продольной оси

$$F_{nd^*} = F_{\text{АП}^*} + (-F_{\text{ВП}^*} \cos 60^\circ) = \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1}{2} = 1,3.$$

После поворота ротора приемника на угол $\alpha_n = \alpha_d = 60^\circ$ диаграмма МДС синхронизации приемника примет вид, представленный на рис. 10.7, б. Из диаграммы следует, что результирующая МДС по продольной оси равна нулю:

$$E_{nd^*} = F_{\text{АП}^*} \cos 60^\circ + (-F_{\text{ВП}^*} \cos 60^\circ) = 0.$$

Особенность работы трансформаторной системы состоит в том, что сельсин-приемник этой системы самостоятельно не обрабатывает заданный угол поворота, а только выдает сигнал на включение исполнительного двигателя, который осуществляет обработку заданного угла поворота. Применяв в системе исполнительный двигатель требуемой мощности, можно посредством трансформаторной системы

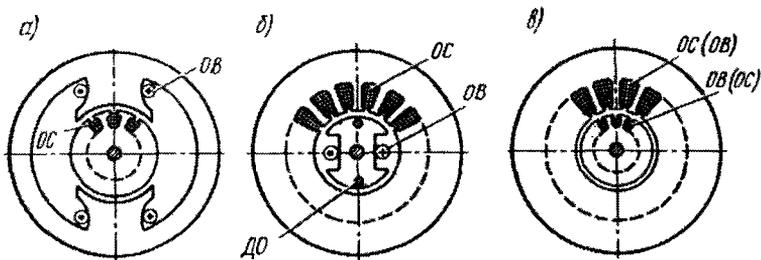


Рис. 10.8. Магнитные системы однофазных контактных сельсинов с явнополюсным статором (а), с явнополюсным ротором (б), неявнополюсная (в)

передачи угла управлять угловым положением вала рабочего механизма.

Точность работы трансформаторной системы зависит от: формы и распределения магнитной индукции в воздушном зазоре сельсинов; остаточной ЭДС; удельного выходного напряжения; удельной выходной мощности; магнитной несимметрии; сопротивления линии связи; количества приемников, подключенных к одному датчику.

Для обеспечения синусоидальной зависимости $U_{\text{вых}} = f(\alpha_{\text{д}})$ необходимо, чтобы график распределения магнитной индукции вдоль воздушного зазора по периметру ротора был синусоидальным. С этой целью в трансформаторных системах применяют сельсины неявнополюсной конструкции (рис. 10.8, в).

Остаточная ЭДС сельсина-приемника $E_{\text{ост}}$ — это ЭДС на выходе приемника при согласованном состоянии системы. Обычно $E_{\text{ост}} = 0,2 \div 0,5$ В. Причины наведения остаточной ЭДС: всякого рода дефекты, возникающие при изготовлении сельсинов; емкостная связь между обмотками возбуждения и синхронизации и т. п. Для исключения влияния остаточной ЭДС на работу системы требуется такая настройка усилителя мощности, чтобы сигнал $U_{\text{вых}} = E_{\text{ост}}$ создавал напряжение на выходе усилителя, меньшее напряжения трогания исполнительного двигателя.

Удельное выходное напряжение сельсина-приемника — это напряжение $U_{\text{вых}}$, приходящееся на один градус угла рассогласования:

$$U_{\text{уд}} = E_{\text{max}} \sin 1^\circ = 0,0175 E_{\text{max}}. \quad (10.26)$$

Удельная выходная мощность $P_{\text{уд}}$ — это мощность, которую можно снять с выходной обмотки сельсина-приемника при угле рассогласования в один градус. Минимально допустимым значением мощности на выходе приемника считается такое значение, при котором на выходе усилителя появляется напряжение.

Влияние сопротивления линии связи на точность трансформаторной системы заключается в том, что сопротивление проводов этой линии уменьшает токи в обмотках синхронизации [см. (10.23)]. Это уменьшает МДС по продольной оси сельсина-приемника, а следовательно, уменьшает удельное напряжение сельсина-приемника и точность системы.

Ток в обмотке возбуждения сельсина-приемника создает реакцию этой обмотки, ослабляющую ЭДС $E_{\text{вых}}$. Для уменьшения реакции желательно, чтобы усилитель мощности имел достаточно большое входное сопротивление, что уменьшает ток в обмотке возбуждения приемника.

Точность сельсина-приемника в трансформаторной системе определяется так же, как и в индикаторной системе [см. (10.21)].

■ 10.4. Конструкция сельсинов

По конструкции различают: контактные и бесконтактные сельсины.

Контактные сельсины. Отличительный признак контактных сельсинов — наличие у них контактных колец и щеток, посредством которых обмотка ротора соединяется с внешней цепью. Обычно сельсины делают двухполюсными. Магнитную систему контактного сельсина (сердечники статора и ротора) делают из листовой электротехнической стали. Сельсины могут быть явнополюсными и неявнополюсными. В явнополюсных сельсинах один из элементов магнитопровода (статор или ротор) имеет два явно выраженных полюса с полюсными катушками обмотки возбуждения *ОВ*. Тогда другой элемент (ротор или статор) делают неявнополюсным с распределенной обмоткой синхронизации *ОС*, состоящей из трех обмоток фаз, сдвинутых в пространстве относительно друг друга на 120° (рис. 10.8, *а, б*). Если ротор сельсина-приемника явнополюсный, то на его сердечнике обычно располагают демпферную обмотку *ДО* в виде короткозамкнутого витка, ось которого перпендикулярна оси полюсов (см. § 10.2). В неявнополюсных сельсинах обмотки статора и ротора делают распределенными. При этом обмотки синхронизации *ОС* и возбуждения *ОВ* могут быть расположены как на роторе, так и на статоре (рис. 10.8, *в*).

В индикаторных системах обычно применяют явно-полюсные сельсины, так как они имеют повышенное значение удельного синхронизирующего момента (см. рис. 10.4, *б*, график 1). В трансформаторных системах используют неявнополюсные сельсины, так как их удельный синхронизирующий момент меньше, чем у явнополюсных (см. рис. 10.4, *б*, график 2), но распределение магнитной индукции в воздушном зазоре практически синусоидально, что обеспечивает им необходимую точность в трансформаторной системе (см. § 10.3).

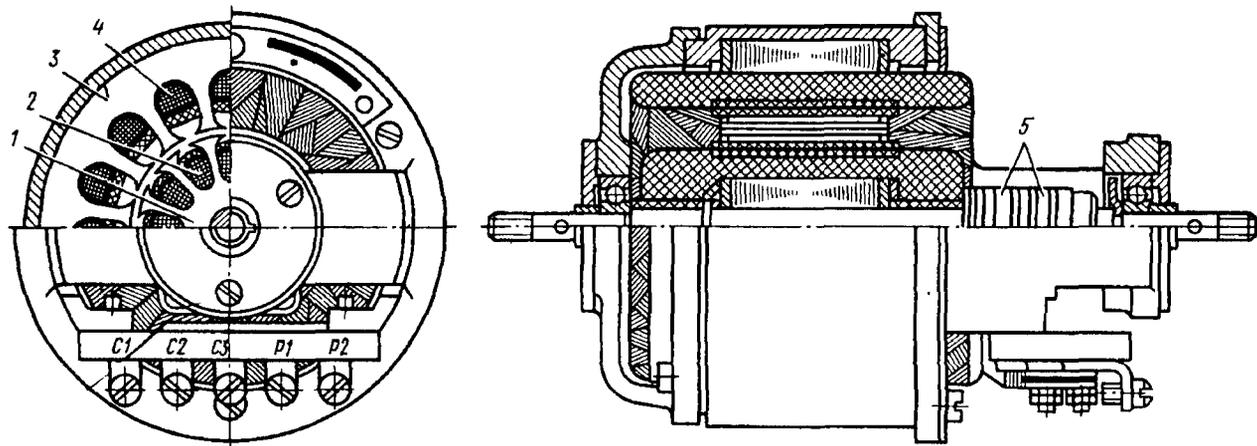


Рис. 10.9. Устройство контактного сельсина

На рис. 10.9 показано устройство контактного сельсина с неявно-полусной магнитной системой. Обмотка синхронизации 4 расположена на сердечнике статора 3, а обмотка возбуждения 2 — на сердечнике ротора 1. Контактные кольца 5 и щетки обычно изготавливают из сплава, содержащего серебро, что способствует более надежной и продолжительной работе этого контактного узла сельсинов. Обмотка возбуждения может быть расположена как на роторе, так и на статоре. При расположении ее на роторе число контактных колец равно двум. В этом случае через кольца и щетки ток возбуждения проходит непрерывно, даже когда система согласована. Если же на роторе расположена обмотка синхронизации, то ток через кольца и щетки (в случае индикаторной системы) проходит только при рассогласовании системы. При этом количество колец увеличивается до трех, что ведет к росту момента сопротивления за счет возросших сил трения на контактном узле.

Значительное влияние на свойства сельсина оказывает сила прижатия щеток к контактным кольцам. При слабом прижатии уменьшается момент сопротивления на валу сельсина, но возрастает переходное электрическое сопротивление скользящего контакта и, как следствие, погрешность индикаторной системы. Если щетки прижаты слабо, то при вибрациях возможны периодические потери скользящего контакта и нарушение работы системы. При сильном прижатии щеток к кольцам улучшается контакт с кольцами, но возрастает момент сопротивления за счет возросших сил трения щеток о кольца, что увеличивает погрешность индикаторной системы и сокращает срок службы щеток и контактных колец из-за их быстрого износа.

Наличие скользящего контакта — существенный недостаток контактных сельсинов, снижающий их надежность и точность.

Чтобы увеличить надежность контактных сельсинов, кольца и щетки обычно изготавливают из сплавов, содержащих серебро. Однако и эта мера полностью не избавляет контактные сельсины от присущих им недостатков.

Бесконтактные сельсины. Наибольшее применение в устройствах автоматики получили бесконтактные сельсины, не имеющие скользящих электрических контактов (колец и щеток). Эти сельсины отличаются от контактных высокой точностью и стабильностью характеристик при колебаниях температуры, влажности и т. п., а также высокой эксплуатационной надежностью.

В настоящее время применяются бесконтактные сельсины двух конструкций: сельсины с двумя обмотками на статоре и сельсины с кольцевым трансформатором. Сельсины с двумя обмотками на статоре были разработаны российскими учеными А. Г. Иосифьяном и Д. В. Свечарником. На рис. 10.10 показана конструктивная схема такого сельсина. Ротор 6 представляет собой цилиндр из ферромагнитно-

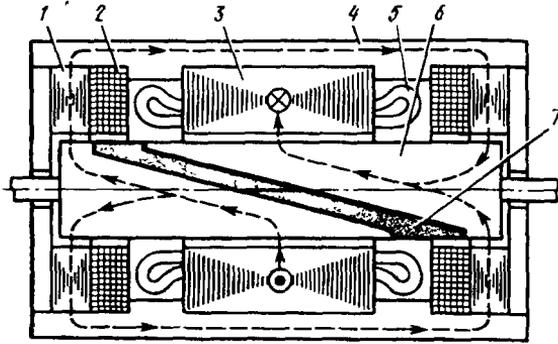


Рис. 10.10. Конструктивная схема бесконтактного сельсина конструкции Иосифьяна и Свечарника

го материала (стали), состоящий из двух магнитно разделенных частей, называемых полюсами. В качестве магнитной изоляции, разделяющей полюса ротора друг от друга, используется алюминиевая прослойка. Эта же прослойка скрепляет полюса ротора. С торцевых сторон сельсина расположены тороидальные сердечники 1, выполненные из тонколистовой электротехнической стали. Внутренняя поверхность этих сердечников расположена над ротором, а к их внешней поверхности примыкают стержни внешнего магнитопровода 4. Однофазную обмотку возбуждения сельсина выполняют в виде двух дисковых катушек 2, расположенных с противоположных сторон статора между обмоткой синхронизации 5 и тороидальными сердечниками 1.

Магнитный поток возбуждения, замыкаясь вокруг правой дисковой катушки 2 по правому тороидальному сердечнику 1, через воздушный зазор проходит в один из полюсов ротора 6. Благодаря немагнитному промежутку 7, разделяющему полюса ротора, этот магнитный поток проходит через воздушный зазор между ротором и статором в сердечник статора 3 с обмоткой синхронизации 5. Пройдя по зубцам и спинке этого сердечника, поток через воздушный зазор проходит во второй полюс ротора. Затем через зазор и левый тороидальный сердечник 1 вокруг левой дисковой катушки 2 он попадает на стержни внешнего магнитопровода 4 и замыкается в правом тороидальном сердечнике 1.

Таким образом, в процессе работы сельсина пульсирующий магнитный поток возбуждения замыкается в магнитной системе сельсина, сцепляясь с обмоткой синхронизации на сердечнике статора. При этом если поворачивать ротор сельсина, то вместе с полюсами ротора будет поворачиваться и магнитный поток, т. е. в бесконтактном сельсине, так же как и в контактном, потокосцепление потока возбужде-

ния с обмоткой синхронизации зависит от пространственного положения (угла поворота) ротора. Благодаря разделению ротора бесконтактного сельсина на магнитно изолированные полюса, обмотки синхронизации и возбуждения можно расположить на статоре и отказаться от контактных колец и щеток.

Магнитный поток возбуждения (см. рис. 10.10), замыкаясь в магнитопроводе сельсина, четыре раза проходит через воздушный зазор. Поэтому для создания в сельсине требуемого магнитного потока требуется значительная МДС обмотки возбуждения, что является причиной повышения габаритных размеров бесконтактного сельсина по сравнению с контактным сельсином.

В табл. 10.1 приведены технические данные контактного и бесконтактного сельсинов-приемников с одинаковыми максимальными значениями синхронизирующих моментов. Несмотря на большую массу и габаритные размеры, бесконтактные сельсины широко применяются в устройствах автоматики, что объясняется их повышенной надежностью и стабильностью характеристик.

Таблица 10.1

Тип и конструкция сельсина	Параметры			
	частота тока, Гц	потребляемая мощность, Вт	максимальный синхронизирующий момент, 10^{-2} Н · м	масса, кг
СС-501 контактный	50	13	176	2,8
БЦ-501 бесконтактный	50	29	176	4,1

В последнее время применяются бесконтактные сельсины с кольцевым трансформатором (рис. 10.11). Обмотка синхронизации 2 такого сельсина расположена на статоре 4, обмотка возбуждения 1 — на роторе 3. Питание обмотки возбуждения осуществляется посредством кольцевого трансформатора. Магнитопровод этого трансформатора состоит из двух частей, разделенных воздушным зазором. Неподвижная часть 5 с первичной обмоткой 6 расположена на статоре, а вращающаяся часть 8 со вторичной обмоткой 7 — на роторе. Энергия из первичной обмотки трансформатора 6 передается во вторичную обмотку 7, связанную с обмоткой возбуждения сельсина. Магнитный поток Φ в кольцевом магнитопроводе трансформатора дважды проходит через воздушный зазор, что является причиной повышенного значения намагничивающего тока, а следовательно, и габаритных размеров трансформатора. Однако при частотах 400, 500 и 1000 Гц, для которых предназначен рассматриваемый сельсин, кольцевой трансформатор имеет небольшие габаритные размеры, позволяющие расположить его в корпусе сельсина.

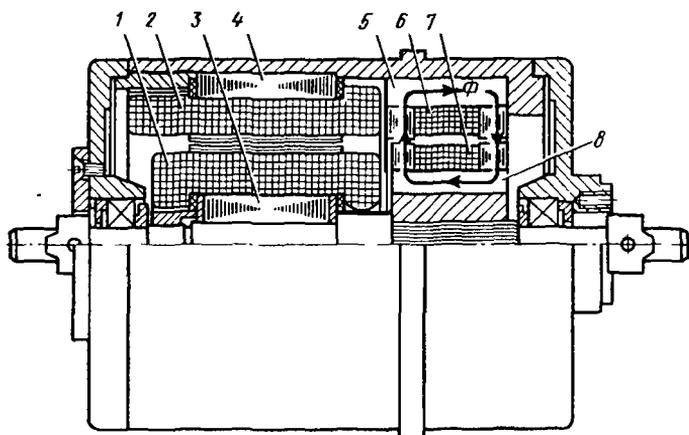


Рис. 10.11. Устройство бесконтактного сельсина с кольцевым трансформатором

10.5. Дифференциальный сельсин

В системах дистанционной передачи угла применяются дифференциальные сельсины, назначение которых — воспроизводить угол поворота, равный сумме или разности углов, заданных двумя сельсин-датчиками. Дифференциальный сельсин имеет две трехфазные обмотки, одна из которых расположена в пазах неявнополюсного статора, а другая — в пазах неявнополюсного ротора. Вывод обмотки ротора для подключения к внешней сети осуществлен посредством трех контактных колец и щеток.

Рассмотрим принцип работы индикаторной системы дистанционной передачи угла, содержащей два сельсина-датчика *СД1* и *СД2*, и один дифференциальный сельсин приемник *СП—СД* (рис. 10.12). Допустим, что ротор дифференциального сельсина заторможен. При включении в сеть переменного тока обмоток возбуждения *ОВ1* и *ОВ2* сельсин-датчиков *СД1* и *СД2* создаются пульсирующие магнитные потоки $\Phi_{в1}$ и $\Phi_{в2}$. Поток $\Phi_{в1}$ наводит в обмотках фазы синхронизации датчика *СД1* электродвижущие силы, под действием которых в цепи синхронизации этого сельсина появятся токи. Проходя по обмотке синхронизации дифференциального сельсина, эти токи создают МДС $F_{дс1}$. При повороте ротора датчика *СД1* на угол $\alpha_{д1}$ по часовой стрелке вектор МДС $F_{дс1}$ повернется на такой же угол, но против часовой стрелки. Аналогичные процессы происходят и в цепи синхронизации обмоток датчика *СД2* и дифференциального сельсина: при повороте ротора датчика *СД2* на угол $\alpha_{д2}$ по часовой стрелке вектор МДС $F_{дс2}$ обмотки ротора дифференци-

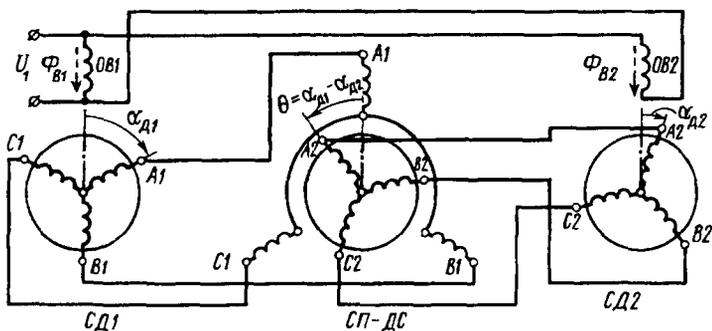


Рис. 10.12. Схема индикаторной системы дистанционной передачи с дифференциальным сельсином

ального сельсина также повернется на угол $\alpha_{д2}$, но против часовой стрелки. В итоге между векторами МДС $F_{дс1}$ и $F_{дс2}$ дифференциального сельсина появится пространственный угол, равный разности углов, заданных датчиками $CD1$ и $CD2$:

$$\theta = \alpha_{д1} - \alpha_{д2}. \quad (10.27)$$

В результате взаимодействия МДС $F_{дс1}$ и $F_{дс2}$ на роторе дифференциального сельсина возникает вращающий момент $M_{д}$. Поэтому, если растормозить ротор дифференциального сельсина $СП-DC$, то под действием момента $M_{д}$ ротор повернется на угол θ так, чтобы векторы МДС $F_{дс1}$ и $F_{дс2}$ совпали по направлению и создали в магнитной системе дифференциального сельсина результирующий магнитный поток.

Если роторы датчиков $CD1$ и $CD2$ повернуть на углы $\alpha_{д1}$ и $\alpha_{д2}$ в разные стороны, то ротором дифференциального сельсина будет воспроизведен угол поворота, равный сумме заданных углов:

$$\theta = \alpha_{д1} + \alpha_{д2}. \quad (10.28)$$

Особенностью работы индикаторных систем с дифференциальными сельсинами является протекание токов в цепях синхронизации после отработки дифференциальным сельсином заданных углов, т. е. в согласованном состоянии.

■ 10.6. Магнесины

Магнесин — это электромеханическое устройство, состоящее из тороидального сердечника без пазов, набранного из тонких листов пермаллоя, и спиральной обмотки, намотанной поверху сердечника. Внутри тороидального сердечника расположен постоянный магнит

цилиндрической формы. Индикаторная магнессинная система состоит из магнессина-датчика D и магнессина-приемника $П$. Обмотки магнессинов (рис. 10.13, a) включены в сеть переменного тока, а их выводы $B_d — B_n$ и $C_d — C_n$, расположенные под углом 120° относительно друг друга, соединены линией связи. При подаче напряжения U_1 на обмотки магнессинов в тороидальных сердечниках возникнут переменные магнитные потоки возбуждения Φ_B , изменяющиеся во времени с частотой питающей сети f_1 . Эти потоки наводят в обмотках магнессинов переменную ЭДС E_B частоты f_1 . В момент времени, когда потоки Φ_B достигнут максимального значения, происходит сильное насыщение сердечников и их магнитная проводимость Λ уменьшается. Таким образом, дважды за один период потоки возбуждения достигают максимальных значений $+\Phi_{Bmax}$ и $-\Phi_{Bmax}$, а магнитная проводимость Λ — пульсирует (рис. 10.13, b). Магнитный поток постоянного магнита Φ_n замыкается в сердечнике магнессина, а так как магнитная проводимость сердечника пульсирует, то магнитный поток Φ_n также становится пульсирующим и наводит в обмотке магнессина переменную ЭДС E_n удвоенной частоты $f_2 = 2f_1$ (рис. 10.13, b). Электродвижущие силы E_B основной частоты f_1 в обмотках магнессинов не зависят от положения роторов (постоянных магнитов) датчика и приемника и не создают в обмотках магнессинов электрических токов. Электродвижущие силы E_n удвоенной частоты f_2 при согласованном положении роторов датчика и приемника будут создавать одинаковые потенциалы на соответствующих одноименных точках обмоток датчика и приемника. Если ротор датчика повернуть на угол α_d , то потокосцепление с потоком Φ_n изменится и потенциалы одноименных точек обмо-

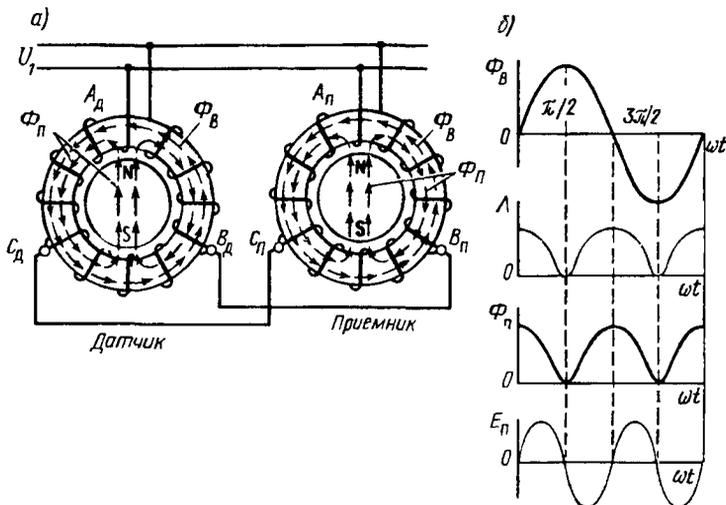


Рис. 10.13. Система синхронной связи на магнессинах

ток датчика и приемника, соединенных проводами линии связи, окажутся неодинаковыми. В итоге в обмотках датчика и приемника системы появятся токи удвоенной частоты f_2 . Эти токи, взаимодействуя с потоком Φ_n в датчике и приемнике, создадут синхронизирующие моменты, стремящиеся повернуть роторы датчика и приемника в согласованное положение, после чего потенциалы одноименных точек обмоток датчика и приемника вновь станут одинаковыми и токи в обмотках магнесинов прекратятся. Таким образом, магнесины, как и сельсины, обладают свойством самосинхронизации в пределах одного оборота ротора. Синхронизирующий момент магнесинов меньше, чем у сельсина, но по конструкции они проще сельсинов, не имеют скользящих контактов и при отсутствии нагрузочного момента на валу магнесина-приемника обеспечивают высокую точность передачи и воспроизведения заданного угла поворота. Малые габаритные размеры и массы магнесинов, высокая точность ($\Delta\theta \leq 2,5^\circ$) обеспечили им успешное применение в ряде устройств автоматики на сравнительно небольшие расстояния передачи.

Контрольные вопросы

1. От каких причин зависит величина угла рассогласования в индикаторной системе передачи угла?
2. Что изменится в работе индикаторной системы, если поменять местами провода, присоединенные к обмотке синхронизации или к обмотке возбуждения СП?
3. Из каких элементов состоит трансформаторная система передачи угла?
4. Какой угол поворота воспроизводит дифференциальный сельсин?

Глава 11

Вращающиеся трансформаторы

11.1. Назначение и устройство вращающихся трансформаторов

Вращающиеся (поворотные) трансформаторы (ВТ) предназначены для получения переменного напряжения, зависящего от угла поворота ротора. По назначению ВТ относятся к информационным электрическим машинам (см. § 9.1) и применяются в системах автоматического регулирования в качестве измерительных элементов (датчиков угла) для измерения рассогласования между двумя вращающимися осями. В вычислительных устройствах вращающиеся трансформаторы используются при решении различных математических задач, связанных с построением треугольников, преобразованием координат, сложением и разложением векторов и т. п.

Вращающийся трансформатор конструктивно представляет собой электрическую машину индукционного типа малой мощности. Наибольшее применение получили двухполюсные ВТ с двумя парами одинаковых взаимно перпендикулярных обмоток: обмотки w_1 и w_k ($C1 - C2$ и $C3 - C4$) расположены на статоре; обмотки w_2 и w_3 ($P1 - P2$ и $P3 - P4$) — на роторе (рис. 11.1). Обмотка возбуждения ($C1 - C2$) включается в сеть переменного тока, компенсационная обмотка $C3 - C4$ замыкается накоротко или на резистор. Обмотки на роторе называются вторичными: синусной $P1 - P2$ и косинусной $P3 - P4$. Электрический контакт с обмотками ротора осуществляется с помощью контактных колец и щеток (аналогично контактным сельсинам) либо посредством спиральных пружин, если ВТ работает в режиме ограниченного угла поворота. В последнем случае угол поворота ротора ВТ ограничивается максимальным углом закручивания спиральных пружин.

Принцип работы вращающихся трансформаторов основан на взаимной индуктивности между обмотками статора и ротора, которая изменяется в определенной функциональной зависимости от угла поворота ротора.

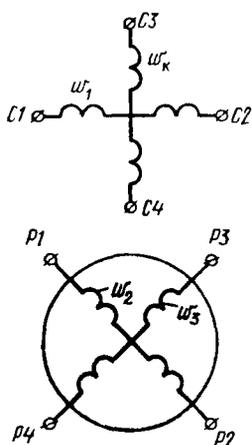


Рис. 11.1. Принципиальная схема вращающегося трансформатора

Электродвижущие силы, наводимые пульсирующим магнитным потоком возбуждения в обмотках ротора, строго следуют этой зависимости.

Если ВТ используется в качестве измерительного элемента, то поворот ротора осуществляется посредством редукторного механизма высокой точности, который либо встраивается в корпус ВТ, либо монтируется отдельно от ВТ и соединяется с его валом. Если ВТ предназначен для работы в режиме поворота ротора в пределах определенного угла, то в качестве обмоток возбуждения и компенсационной используются обмотки статора, а в качестве вторичных — обмотки ротора.

Если ВТ работает в режиме непрерывного вращения ротора, то обычно применяют «обратное» использование обмоток: обмотки ротора используют в качестве обмоток возбуждения и компенсационной, а обмотки статора — в качестве вторичных. Если компенсационная обмотка замыкается накоротко, то при «обратном» использовании обмоток на роторе применяют лишь два контактных кольца, что упрощает конструкцию, повышает надежность и точность ВТ.

В зависимости от графика функциональной зависимости ЭДС вторичной обмотки от угла поворота ротора вращающиеся трансформаторы разделяют на следующие типы:

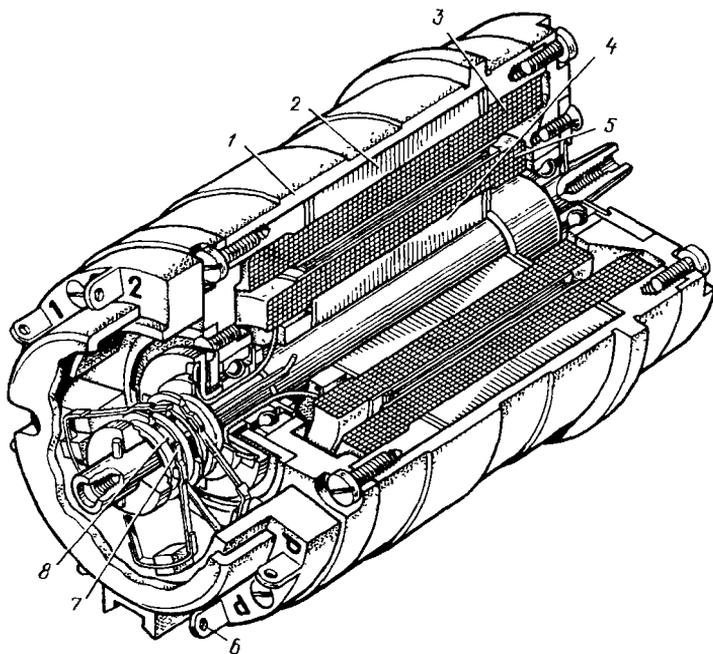


Рис. 11.2. Устройство вращающегося трансформатора

синусно-косинусный вращающийся трансформатор (СКВТ) — у него возникают напряжение U_2 на выходе обмотки w_2 , находящееся в синусной зависимости от угла поворота ротора α , и напряжение U_3 на выходе обмотки w_3 , находящееся в косинусной зависимости от угла поворота ротора α ;

линейный вращающийся трансформатор (ЛВТ) — у него выходное напряжение U_2 находится в прямолинейной зависимости от угла α ;

вращающийся трансформатор — построитель (ПВТ)—предназначен для решения геометрических задач.

Кроме того, вращающиеся трансформаторы могут применяться в качестве масштабных трансформаторов (МВТ) для согласования напряжений отдельных каскадов автоматического устройства, фазовращателей, электрических машин синхронной связи в трансформаторных системах дистанционной передачи угла.

На рис. 11.2 показано устройство вращающегося трансформатора. В корпусе 1 расположен шихтованный сердечник статора 2, в пазы которого уложены распределенные обмотки 3. В пазах шихтованного сердечника ротора 4 также находятся распределенные обмотки 5. Электрический контакт обмоток ротора с выводными клеммами 6 осуществляется посредством щеток 7 и контактных колец 8.

■ 11.2. Синусно-косинусный вращающийся трансформатор

Синусно-косинусный вращающийся трансформатор в синусном режиме. В этом режиме работы используется только одна обмотка ротора — синусная w_2 (рис. 11.3, а). При включении в сеть обмотки возбуждения w_1 в ней появляется ток I_1 , который создает магнитный поток возбуждения Φ_v . Сцепляясь со вторичной обмоткой w_2 , поток Φ_v наводит в ней ЭДС E_2 , величина которой зависит от угла поворота ротора α . В режиме холостого хода ($I_2 = 0$) напряжение на выходе синусной обмотки

$$U_2 = U_{2\max} \sin \alpha, \quad (11.1)$$

где $U_{2\max}$ — максимальное действующее значение напряжения на выходе синусной обмотки, соответствующее углу поворота ротора $\alpha = 90^\circ$. При подключении нагрузки Z_n к зажимам $P1—P2$ синусной обмотки в ее цепи появится ток I_2 . Созданный током магнитный поток Φ_2 можно разложить на составляющие: по продольной оси, направленную встречно потоку возбуждения $\dot{\Phi}_{2d} = \dot{\Phi}_2 \sin \alpha$, и по поперечной оси $\dot{\Phi}_{2q} = \dot{\Phi}_2 \cos \alpha$, вызывающую искажение магнитного потока возбуждения (рис. 11.3, б).

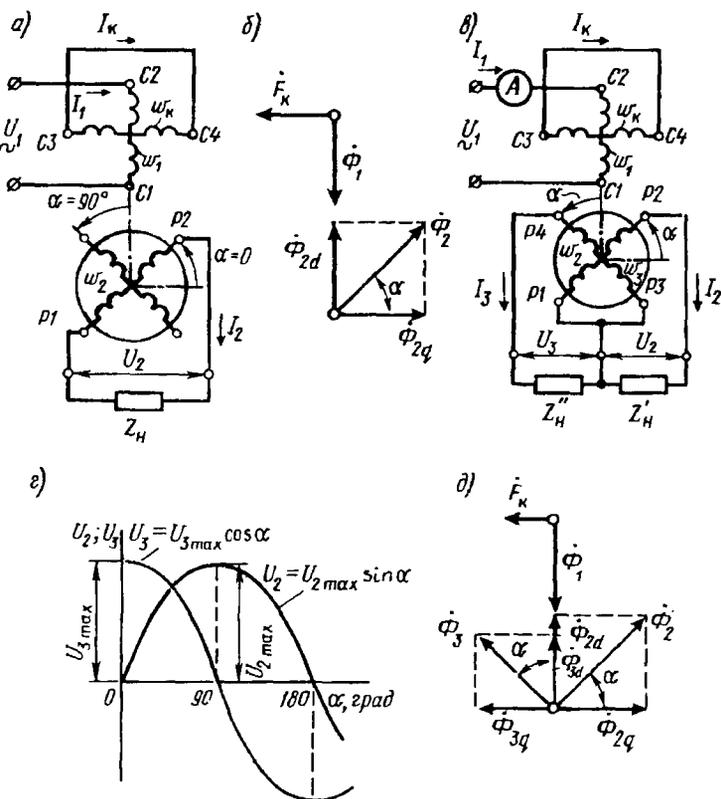


Рис. 11.3. Схемы и диаграммы СКВТ в синусном (а, б) и синусно-косинусном (в, г, д) режимах

Размагничивающее влияние составляющей потока по продольной оси $\dot{\Phi}_{2d}$ компенсируется увеличением тока в обмотке возбуждения I_1 . Искажение магнитного потока возбуждения, вызванное действием поперечной составляющей потока $\dot{\Phi}_{2q}$, нарушает синусоидальную зависимость напряжения U_2 синусной обмотки w_2 от угла поворота ротора и вносит погрешность в работу СКВТ, возрастающую с увеличением тока нагрузки I_2 . Устранение этого нежелательного явления осуществляется путем симметрирования вращающегося трансформатора.

В синусном режиме работы СКВТ, когда используется только одна вторичная обмотка, применяется *первичное симметрирование*, основанное на применении компенсационной обмотки w_k . С этой целью обмотку w_k замыкают на резистор сопротивлением

$$Z_k = Z_i + Z_{np}, \quad (11.2)$$

где Z_i и Z_{np} — соответственно внутреннее сопротивление источника переменного тока и сопротивление проводов, соединяющих обмотку w_1 с этим источником.

Обычно сопротивление проводов $Z_{np} \approx 0$, тогда $Z_k = Z_i$. В большинстве случаев обмотку w_1 подключают к источнику большой мощности, рассчитанному для питания нескольких потребителей постоянного тока. В этом случае внутреннее сопротивление источника $Z_i \approx 0$ и первичное симметрирование СКВТ осуществляется замыканием накоротко обмотки w_k .

Составляющая магнитного потока ротора по поперечной оси $\dot{\Phi}_{2q}$, сцепляясь с компенсационной обмоткой, наводит ЭДС E_k . Так как обмотка замкнута, то ЭДС E_k создает в ней ток I_k , который наводит МДС компенсационной обмотки \dot{F}_k направленную в соответствии с правилом Ленца встречно потоку Φ_{2q} (поток $\dot{\Phi}_{2q}$ является причиной возникновения ЭДС E_k и МДС \dot{F}_k). В результате поток по поперечной оси $\dot{\Phi}_{2q}$ будет в значительной степени ослаблен (скомпенсирован) и погрешность, обусловленная нагрузкой СКВТ, намного снизится.

Синусно-косинусный вращающийся трансформатор в синусно-косинусном режиме. В этом режиме используются обе вторичные обмотки w_2 и w_3 , смещенные в пространстве относительно друг друга на 90° (рис. 11.3, в). Зависимость напряжения U_2 на выходе обмотки w_2 от угла поворота ротора определяется (11.1), а зависимость напряжения на выходе обмотки w_3 определяется выражением, учитывающим угловой сдвиг этой обмотки относительно обмотки w_2 на 90° :

$$U_3 = U_{3\max} \sin(90^\circ + \alpha) = U_{3\max} \cos \alpha, \quad (11.3)$$

где $U_{3\max}$ — максимальное действующее значение напряжения в обмотке w_3 при ее соосном положении с обмоткой возбуждения w_1 .

Из (11.1) и (11.3) следует, что на выходе СКВТ получают два напряжения, одно из которых пропорционально $\sin \alpha$, а другое — $\cos \alpha$ (рис. 11.3, з).

Обмотки w_2 и w_3 имеют одинаковые параметры, поэтому максимально действующие значения напряжений этих обмоток также одинаковы:

$$U_{2\max} = U_{3\max} = (w_2/w_1)U_1, \quad (11.4)$$

где U_1 — напряжение на входе СКВТ, т. е. на обмотке возбуждения w_1 .

Таким образом, учитывая (11.4), выражения (11.1) и (11.3) запишем в виде

$$\begin{aligned} U_2 &= U_1(w_2/w_1)\sin \alpha; \\ U_3 &= U_1(w_3/w_1)\cos \alpha. \end{aligned} \quad (11.5)$$

Рассмотрим работу СКВТ при неравенстве нагрузок на зажимах синусной и косинусной обмоток, т. е. $Z'_н \neq Z''_н$. При подключении нагрузок в цепях вторичных обмоток появятся токи I_2 и I_3 , которые создадут магнитные потоки $\dot{\Phi}_2$, $\dot{\Phi}_3$ (рис. 11.3, д). Поперечные составляющие этих потоков $\dot{\Phi}_{2q} = \dot{\Phi}_2 \cos \alpha$, $\dot{\Phi}_{3q} = \dot{\Phi}_3 \sin \alpha$ направлены в противоположные стороны и частично взаимно компенсируются. Полная взаимная компенсация будет только при равенстве МДС синусной и косинусной обмоток по поперечной оси:

$$I_2 w_2 k_{\text{об2}} \cos \alpha = I_3 w_3 k_{\text{об3}} \sin \alpha, \quad (11.6)$$

где $k_{\text{об2}}$ и $k_{\text{об3}}$ — обмоточные коэффициенты вторичных обмоток.

Токи во вторичных обмотках СКВТ, соответствующие полной компенсации,

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2 + Z'_н} = \frac{(w_2/w_1)E_1 \sin \alpha}{Z_2 + Z'_н}; \quad (11.7)$$

$$I_3 = \frac{E_3}{Z_3 + Z''_н} = \frac{(w_3/w_1)E_1 \cos \alpha}{Z_3 + Z''_н}, \quad (11.8)$$

где Z_2 и Z_3 — полные сопротивления вторичных обмоток. После подстановки (11.7) и (11.8) в (11.6) получим

$$\frac{(w_2/w_1)E_1 \sin \alpha}{Z_2 + Z'_н} w_2 k_{\text{об2}} \cos \alpha = \frac{(w_3/w_1)E_1 \cos \alpha}{Z_3 + Z''_н} w_3 k_{\text{об3}} \sin \alpha. \quad (11.9)$$

Синусную и косинусную обмотки делают одинаковыми по числу витков и диаметру обмоточного провода, поэтому обмотки имеют одинаковые параметры:

$$w_2 = w_3; \quad k_{\text{об2}} = k_{\text{об3}}; \quad Z_2 = Z_3.$$

Учитывая это, (11.9) запишем в виде

$$Z_2 + Z'_н = Z_3 + Z''_н \quad \text{или} \quad Z'_н = Z''_н \quad (11.10)$$

Таким образом, полная взаимная компенсация поперечных составляющих потоков выходных обмоток СКВТ происходит при равенстве нагрузочных сопротивлений в синусной и косинусной обмотках. Такая компенсация называется *вторичным симметрированием*.

Если нагрузочные сопротивления $Z'_н$ и $Z''_н$ не равны, то вторичное симметрирование получается неполным, так как магнитные потоки $\dot{\Phi}_{2q}$ и $\dot{\Phi}_{3q}$ взаимно компенсируются только частично и в магнитной цепи СКВТ появляется результирующий магнитный поток по поперечной оси:

$$\dot{\Phi}_q = \dot{\Phi}_{2q} + \dot{\Phi}_{3q}. \quad (11.11)$$

Этот поток влияет на магнитный поток возбуждения, нарушает синусоидальный закон распределения магнитной индукции в воздушном зазоре СКВТ, что ведет к погрешностям в работе СКВТ.

Магнитный поток $\dot{\Phi}_g$ при $Z'_n \neq Z''_n$ может быть скомпенсирован путем первичного симметрирования, т. е. за счет магнитного потока компенсационной обмотки $\dot{\Phi}_k$.

При полном вторичном симметрировании СКВТ входное сопротивление на зажимах $C1—C2$ обмотки возбуждения $Z_{вк}$ не зависит от положения ротора (от угла α). Поэтому ток и активная мощность, потребляемые СКВТ, также не зависят от угла α . На этом основан *метод амперметра*, т. е. метод подбора нагрузочных сопротивлений синусной Z'_n и косинусной Z''_n обмоток для осуществления полного вторичного симметрирования. Сущность этого метода состоит в том, что подбираются такие сопротивления нагрузок Z'_n и Z''_n , при которых поворот ротора в ту или иную сторону не вызывает изменения показаний амперметра A , включенного в цепь обмотки возбуждения (рис. 11.3, в).

Более точный метод вторичного симметрирования — *метод вольтметра*. Так как при полном вторичном симметрировании поперечные составляющие потоков синусной и косинусной обмоток взаимно уравновешиваются, то в компенсационной обмотке они не наводят ЭДС. Следовательно, сопротивления нагрузок Z'_n и Z''_n подбираются такими, чтобы показание вольтметра, включенного на выводы разомкнутой компенсационной обмотки $C3—C4$, было нулевым в любом положении ротора.

Точность вращающегося трансформатора в режиме СКВТ определяется следующими показателями: погрешностью воспроизведения синусной (косинусной) зависимости; асимметрией нулевых точек; электродвижущей силой компенсационной обмотки; остаточной ЭДС; разностью коэффициентов трансформации между обмоткой возбуждения и вторичными обмотками.

Погрешность воспроизведения синусной (косинусной) зависимости, %

$$\varepsilon_{\text{СКВТ}} = \Delta U \cdot 100 / U_{\text{max}}, \quad (11.12)$$

где ΔU — наибольшее среднее отклонение напряжения на выходе СКВТ от расчетного синусоидального (косинусоидального) закона зависимости выходного напряжения за полные обороты ротора по часовой стрелке и против часовой стрелки:

$$\Delta U = 0,5(\Delta U_1 + \Delta U_2), \quad (11.13)$$

ΔU_1 и ΔU_2 — максимальные положительное и отрицательное отклонения выходного напряжения от расчетного; U_{max} — максимальное действующее значение напряжения в выходной обмотке [см. (11.4)].

Асимметрия нулевых точек определяется при питании СКВТ со стороны каждой из первичных обмоток по формуле

$$\Delta\alpha_0 = 0,5(\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2), \quad (11.14)$$

где $\Delta\alpha_1$ и $\Delta\alpha_2$ — максимальные положительное и отрицательное отклонения (угл. с) ротора СКВТ от углов, кратных 90° , соответствующих минимальным значениям ЭДС вторичных обмоток E_2 и E_3 .

Электродвижущая сила компенсационной обмотки определяется в процентах от номинального напряжения возбуждения U_1 :

$$e_k = E_k \cdot 100/U_1, \quad (11.15)$$

где E_k — ЭДС компенсационной обмотки, измеренная на выводах СЗ—С4 при номинальном напряжении U_1 на обмотке возбуждения.

Остаточная ЭДС в нулевых точках определяется в процентах от максимально действующего значения выходного напряжения U_{\max} :

$$e_{\text{ост}} = E_{\text{ост}} \cdot 100/U_{\max}, \quad (11.16)$$

где $E_{\text{ост}}$ — остаточная (минимальная) ЭДС, измеренная на выводах вторичной обмотки.

Разность коэффициентов трансформации определяет отклонение в параметрах синусной и косинусной обмоток СКВТ, %

$$\Delta k = (k_{\max} - k_{\min}) 100/k_{\max}, \quad (11.17)$$

где k_{\max} и k_{\min} — наибольшее и наименьшее значения коэффициентов трансформации между обмотками.

Существует шесть классов точности СКВТ, которые характеризуются допустимыми показателями, приведенными в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Вид погрешности	Класс точности СКВТ					
	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2
$\epsilon_{\text{СКВТ}}$, %	+0,005	+0,01	$\pm 0,02$	+0,05	+0,1	$\pm 0,2$
$\Delta\alpha_0$, с	± 10	+20	+40	+100	+200	± 400
e_k , %, не более	0,04	0,08	0,12	0,3	0,6	1,2
$e_{\text{ост}}$, %, не более	0,003	0,006	0,01	0,025	0,05	0,10
Δk , %, не более	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2

В схемах автоматики наряду с рассмотренными двухполосными ВТ применяются многополосные вращающиеся трансформаторы. Они обычно используются в устройствах точного отсчета, а также в схемах с малым углом поворота. Такие ВТ выполняются плоскими, с относительно большим диаметром (рис. 11.4), что позволяет приме-

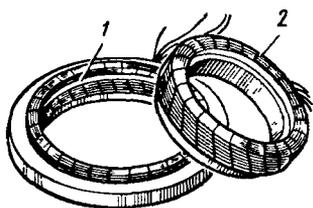


Рис. 11.4. Статор и ротор многополюсного ВТ

нить в них обмотки с большим числом полюсов. Благодаря небольшим габаритным размерам и специальной конструкции эти вращающиеся трансформаторы встраиваются непосредственно в автоматическое или измерительное устройство. Статор 1 и ротор 2 многополюсных ВТ закрепляются на частях прибора, относительное угловое перемещение которых они должны регистрировать.

11.3. Линейный вращающийся трансформатор

Зависимость выходного напряжения U_2 линейного вращающегося трансформатора от угла поворота ротора α имеет вид

$$U_2 = \frac{w_2}{w_1} \cdot \frac{U_1 \sin \alpha}{1 + m \cos \alpha}, \quad (11.18)$$

где m — постоянная величина, определяемая магнитными и электрическими параметрами ЛВТ.

Если $m \approx 0,54$, то зависимость $U_2 = f(\alpha)$ линейна с погрешностью не более 1% в пределах изменения угла поворота ротора от 0 до $\pm 60^\circ$ (рис. 11.5, а). Для получения указанной зависимости $U_2 = f(\alpha)$ применяют следующую схему включения обмоток ЛВТ: синусная обмотка w_2 соединена последовательно с компенсационной обмоткой w_k , а косинусная обмотка w_3 замкнута на неизменное сопротивление Z_c (рис. 11.5, б), величина которого выбирается такой, чтобы обеспе-

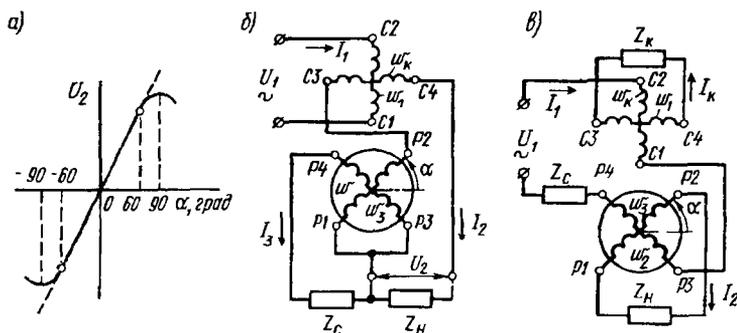


Рис. 11.5. Линейный вращающийся трансформатор
 а — зависимость $U_2 = f(\alpha)$. б — схема со вторичным симметрированием,
 в — схема с первичным симметрированием

читать полное вторичное симметрирование обмоток при заданной нагрузке Z_n . Для определения значения сопротивления Z_c используем уравнение

$$Z_c + Z_3 \approx 2(Z_2 + Z_k + Z_n) \quad (11.19)$$

Таким образом, для полного вторичного симметрирования обмоток ЛВТ необходимо, чтобы сопротивление цепи косинусной обмотки было равно удвоенному значению сопротивления цепи синусной обмотки, включая сопротивления компенсационной обмотки Z_k и нагрузки Z_n . Однако полное вторичное симметрирование обмоток ЛВТ возможно лишь при неизменной нагрузке $Z_n = \text{const}$. В случае переменной нагрузки применяется схема первичного симметрирования (рис. 11.5, б), в которой обмотка возбуждения включена последовательно с косинусной обмоткой и сопротивлением Z_c , а компенсационная обмотка замкнута на сопротивление Z_k . Сопротивления Z_c и Z_k выбирают такими, чтобы магнитные потоки компенсационной обмотки Φ_k и косинусной обмотки по поперечной оси Φ_{3q} , были взаимно скомпенсированы при любом значении угла поворота ротора α .

Точность ЛВТ определяется погрешностью воспроизведения линейной зависимости выходного напряжения от угла поворота ротора α в диапазоне $\pm 60^\circ$ и значением остаточной ЭДС воет в процентах. Погрешность воспроизведения линейной функции, %

$$\varepsilon_{л} = \Delta U \cdot 100 / U_{\max}, \quad (11.20)$$

где среднее значение максимальных положительных ΔU_1 и отрицательных ΔU_2 отклонений выходного напряжения от расчетного при повороте ротора ЛВТ на 60° по часовой стрелке и против часовой стрелки

$$\Delta U = 0,5(\Delta U_1 + \Delta U_2). \quad (11.21)$$

Линейные вращающиеся трансформаторы делятся на три класса точности и характеризуются допустимыми показателями, приведенными ниже:

Класс точности ЛВТ	0,05	0,1	0,2
$\varepsilon_{л}$, %	$\pm 0,05$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$
$e_{\text{ост}}$, %	0,025	0,05	0,1

■ 11.4. Трансформаторная система дистанционной передачи угла на вращающихся трансформаторах

Вращающиеся трансформаторы, аналогично сельсинам, можно использовать в трансформаторной системе дистанционной передачи угла. На рис. 11.6 показана принципиальная схема такой передачи. В

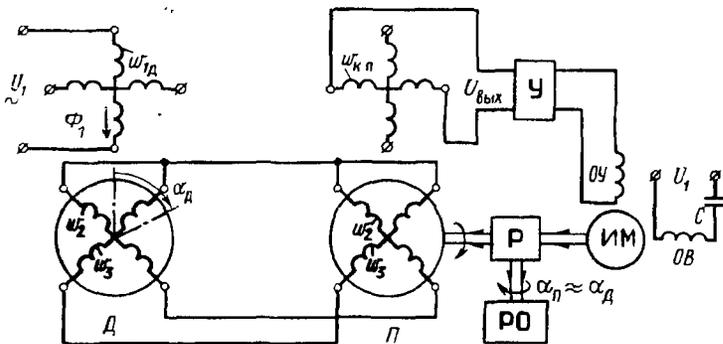


Рис. 11.6. Трансформаторная система дистанционной передачи на СКВТ

качестве датчика D и приемника $П$ применены вращающиеся трансформаторы СКВТ. При подаче напряжения U_1 на обмотку возбуждения $w_{1д}$ в ВТ-датчике возникает пульсирующий магнитный поток Φ_1 . Положение обмоток ротора ВТ-датчика зависит от угла α_d — поворота ротора относительно оси обмотки $w_{1д}$. Магнитный поток Φ_1 , сцепляясь с обмотками ротора w_2 и w_3 ВТ-датчика, индуцирует в них ЭДС:

$$E_2 = E_{2\max} \sin \alpha_d; \quad (11.22)$$

$$E_3 = E_{3\max} \cos \alpha_d$$

Под действием этих ЭДС в цепи синхронизации системы возникают токи, которые, проходя по обмоткам ротора w_2 и w_3 ВТ-приемника, создают пульсирующий магнитный поток Φ_n . Пространственное положение вектора Φ_n определяется углом поворота ротора ВТ-датчика, т. е. при повороте ротора ВТ-датчика на угол α_d вектор потока Φ_n поворачивается на такой же угол. Сцепляясь с обмоткой статора $w_{кп}$, поток Φ_n индуцирует в ней ЭДС $E_{\text{вых}}$, величина которой зависит от угла рассогласования системы $\theta = \alpha_d - \alpha_n$. В остальном работа вращающихся трансформаторов в рассматриваемой системе аналогична работе сельсинов (см. § 10.3).

На выходе ВТ-приемника создается напряжение $U_{\text{вых}} \approx E_{\text{вых}}$, которое подается на вход усилителя мощности $У$. После усиления напряжение поступает на обмотку управления $ОУ$ исполнительного двигателя $ИМ$. Вращение ротора этого двигателя через редуктор $Р$ передается регулируемому органу $РО$ рабочего механизма и ротору ВТ-приемника. После поворота ротора ВТ-приемника на заданный угол система приходит в согласованное состояние, при котором напряжение на выходе ВТ-приемника $U_{\text{вых}} \approx 0$. Это объясняется тем, что после поворота ротора ВТ-приемника на заданный угол вектор

потока Φ_n оказывается практически перпендикулярным оси обмотки $w_{кп}$ и не наводит в ней ЭДС ($E_{\text{вых}} \approx 0$).

В некоторых случаях трансформаторная система выполняется таким образом, что в цепь синхронизации включают обмотки ротора ВТ-датчика и обмотки статора ВТ-приемника.

Важнейший показатель работы системы дистанционной передачи угла — точность отработки угла, заданного на датчике. Точность системы будет тем выше, чем меньше погрешность примененных в ней вращающихся трансформаторов. Кроме того, для повышения точности системы необходимо произвести согласование выходного сопротивления обмоток ротора ВТ-датчика с входным сопротивлением соответствующих обмоток ВТ-приемника.

Показателем точности системы дистанционной передачи угла является *погрешность следования*, представляющая собой разность угловых положений системы. В зависимости от погрешности следования трансформаторные системы с вращающимися трансформаторами делятся на 11 классов точности: +0,1; +0,2; +0,3; +0,5; +1; +2; +3; +5; +10; +20; +30 мин.

В отличие от трансформаторной системы на сельсинах система на ВТ обеспечивает более высокую точность, что объясняется более высокой точностью вращающихся трансформаторов по сравнению с сельсинами. Однако мощность на выходе ВТ-приемника меньше мощности на выходе сельсина-приемника. Поэтому для трансформаторных систем на ВТ требуются усилители мощности с более высоким коэффициентом усиления.

Контрольные вопросы

1. Какова функциональная зависимость выходных напряжений от угла поворота ротора СКВТ?
2. Что такое первичное и вторичное симметрирование?
3. Объясните назначение методов амперметра и вольтметра
4. Какими показателями характеризуется точность СКВТ?
5. Какие виды симметрирования применяют в линейных вращающихся трансформаторах?
6. Объясните работу системы дистанционной передачи угла на ВТ и сравните ее с аналогичной передачей на сельсинах.
7. Что является показателем точности системы дистанционной передачи угла на ВТ?

Глава 12

Электромашинные усилители и преобразователи

12.1. Электромашинные усилители

Электромашинный усилитель (ЭМУ) — это коллекторная электрическая машина, работающая в генераторном режиме и предназначенная для усиления электрических сигналов,

Наибольшее применение получили электромашинные усилители поперечного поля, в которых основным рабочим потоком является магнитный поток обмотки якоря по поперечной оси, представляющий собой магнитный поток реакции якоря.

На коллекторе ЭМУ (рис. 12.1) установлены: щетки q_1, q_2 , расположенные по поперечной оси, т. е. по геометрической нейтрали, и щетки d_1, d_2 , расположенные по продольной оси — оси главных полюсов. Щетки q_1, q_2 замкнуты накоротко, а к щеткам d_1, d_2 подключена нагрузка. Помимо обмотки якоря ЭМУ имеет одну или несколько обмоток управления (V_1, V_2), компенсационную обмотку OK , поперечную подмагничивающую обмотку $OП$ и обмотку добавочных полюсов $ОД$. Якорь усилителя приводится во вращение электродвигателем (асинхронным или постоянного тока).

Если к одной из обмоток управления, например V_1 , подвести напряжение управления U_1 , то возникший при этом ток управления I_1 создаст МДС управления $F_1 = I_1 w_1$, которая, в свою очередь, создаст магнитный поток Φ_1 , направленный по продольной оси. Этот поток пересекает вращающийся якорь и наводит в его обмотке в цепи поперечных щеток ЭДС E_q . Электродвижущая сила E_q невелика, потому что поток управления мал. Но так как цепь щеток $q_1 q_2$ замкнута накоротко то ЭДС E_q вызовет значительный ток I_q , который создаст МДС F_q и магнитный поток Φ_q , направленный по поперечной оси (по геометрической нейтрали) и неподвижный в пространстве. В обмотке вращающегося якоря поток Φ_q наводит ЭДС E_d , которая снимается продольными щетками $d_1 d_2$.

Если к выводам ЭМУ подключить нагрузку r_n , то под действием ЭДС E_d в цепи продольных щеток $d_1 d_2$ начнет протекать ток нагрузки I_d . Таким образом, в ЭМУ можно выделить две ступени усиления мощности: ступень «цепь управления — поперечная цепь обмотки якоря» и ступень «поперечная цепь обмотки якоря — продольная (выходная) цепь обмотки якоря». Усиление мощности на каждой ступени

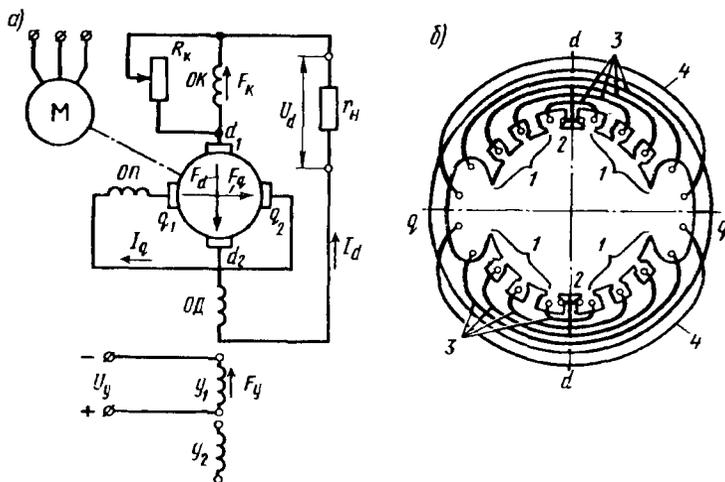


Рис. 12.1. Принципиальная схема (а) и расположение обмоток на статоре (б) электромашинного усилителя поперечного поля

оценивается коэффициентом усиления по мощности. Коэффициент усиления k_{y1} , на первой ступени равен отношению мощностей в поперечной цепи обмотки якоря $P_q = E_q I_q$ и в цепи обмотки управления $P_y = U_y I_y$:

$$k_{y1} = P_q / P_y. \quad (12.1)$$

Коэффициент усиления k_{y2} на второй ступени равен отношению мощности на выходе ЭМУ $P_d = U_d I_d$ к мощности в поперечной цепи обмотки якоря:

$$k_{y2} = P_d / P_q. \quad (12.2)$$

Коэффициент усиления ЭМУ по мощности в целом определяется произведением коэффициентов усиления на отдельных ступенях:

$$k = k_{y1} \cdot k_{y2} = P_d / P_y. \quad (12.3)$$

Коэффициент усиления по мощности достигает значений $(2 \div 20) \cdot 10^3$.

Мощность на выходе ЭМУ P_d — это преобразованная механическая мощность электродвигателя, приводящего во вращение якорь ЭМУ:

$$P_d = P_{д1} - \sum P_{д1} - \sum P_{эмy}, \quad (12.4)$$

где $P_{д1}$ — мощность, потребляемая приводным электродвигателем из сети; $\sum P_{д1}$ — мощность суммарных потерь в этом двигателе; $\sum P_{эмy}$ — мощность суммарных потерь в ЭМУ.

Обмотка добавочных полюсов ОД, служит для улучшения коммутации на продольных щетках $d_1 d_2$. Поперечная подмагничивающая

обмотка *ОП* усиливает магнитный поток по поперечной оси, что позволяет уменьшить значение тока в цепи поперечных щеток q_1q_2 обмотки якоря, а следовательно, улучшить коммутацию на этих щетках (в ЭМУ небольшой мощности эта обмотка отсутствует).

В ЭМУ ток I_d создает МДС по продольной оси F_d , направленную встречно МДС обмотки управления F_y . Так как МДС якоря по продольной оси F_d намного превышает МДС обмотки управления F_y , то даже при небольшой нагрузке размагничивающее влияние реакции якоря по продольной оси настолько велико, что усилитель размагничивается и напряжение на его выходе уменьшается до нуля. Для устранения этого нежелательного явления служит компенсационная обмотка *ОК*, включаемая последовательно в цепь продольных щеток d_1d_2 якоря. Магнитодвижущая сила компенсационной обмотки $F_k = I_d w_k$ направлена по продольной оси встречно МДС реакция якоря. Для полной компенсации необходимо, чтобы $F_d = F_k$. Настройка требуемого вида компенсации осуществляется посредством реостата R_k , шунтирующего компенсационную обмотку *ОК*. Изменяя сопротивление этого реостата, удается регулировать ток в компенсационной обмотке, а следовательно, и ее МДС.

Электромашинные усилители поперечного поля выполняют двухполюсными, при этом каждый из главных полюсов «расщеплен» на две части *1*, между которыми расположены добавочные полюса *2* (рис. 12.1, б). Обмотки управления *4* выполнены сосредоточенными в виде полюсных катушек, надетых на сердечники главных полюсов. Применяют распределенную компенсационную обмотку *3*, используя для ее укладки пазы в полюсных наконечниках главных полюсов. Этим обеспечивается компенсация продольной реакции якоря по всему периметру статора. Обычно ЭМУ выполняют совместно с электродвигателем в общем корпусе. Исключение составляют ЭМУ большой мощности, которые изготавливают отдельно от электродвигателя, а затем монтируют вместе с ним на общей раме.

Рабочие свойства ЭМУ определяются его *внешней характеристикой*, представляющей собой зависимость напряжения на выходе усилителя U_d от тока нагрузки I_d при постоянных частоте вращения и токе в обмотке управления I_y . Напряжение на выходе ЭМУ зависит от тока нагрузки I_d :

$$U_d = E_d - I_d \sum r_d, \quad (12.5)$$

где $\sum r_d$ — суммарное электрическое сопротивление продольной цепи якоря, включающее сопротивления обмотки якоря r_a щеточного контакта продольных щеток $r_{щ}$, обмотки добавочных полюсов $r_{дп}$, компенсационной обмотки r_k (с учетом сопротивления шунтирующего реостата R_k). Так как магнитная система ЭМУ не насыщена, то напряжение U_d — прямолинейная функция тока нагрузки I_d (рис. 12.2). Угол наклона внешней характеристики к оси абсцисс — жесткость

характеристики — зависит от степени компенсации реакции якоря по продольной оси. При *полной компенсации* ($F_k = F_d$) внешняя характеристика достаточно жесткая (график 3), так как уменьшение напряжения на выходе ЭМУ происходит только за счет роста падения напряжения в цепи якоря по продольной оси $I_d \sum r_d$. При *недокомпенсации* ($F_k < F_d$) внешняя характеристика менее жесткая (график 4). Это объясняется тем, что с ростом нагрузки I_d нескомпенсированная часть МДС якоря $F_d' = F_d - F_k$, действуя против МДС обмотки управления F_y , размагничивает усилитель, что ведет к более интенсивному уменьшению напряжения U_d при увеличении нагрузки. При *небольшой перекомпенсации* ($F_k > F_d$) МДС F_k компенсируют не только МДС реакции якоря по продольной оси F_d , но и падение напряжения в продольной цепи якоря $I_d \sum r_d$. В этом случае внешняя характеристика ЭМУ абсолютно жесткая (график 3) и напряжение на выходе усилителя остается неизменным во всем диапазоне изменения нагрузки. При *значительной перекомпенсации* ($F_k \gg F_d$) МДС компенсационной обмотки F_k не только компенсирует МДС F_d , но и создает дополнительный магнитный поток по продольной оси, который, суммируясь с магнитным потоком обмотки управления Φ_y , вызывает увеличение напряжения на выходе усилителя. В этом случае внешняя характеристика ЭМУ приобретает вид восходящей прямой линии (график 1). Значительная перекомпенсация ЭМУ недопустима, так как при этом работа усилителя становится неустойчивой: рост тока нагрузки сопровождается ростом напряжения на выходе усилителя, что ведет к дальнейшему росту тока нагрузки и т. д. Для обеспечения устойчивой работы ЭМУ настраивают с небольшой недокомпенсацией, при которой изменение тока нагрузки I_d от номинального значения до нуля сопровождается увеличением напряжения U_d на 12—20%.

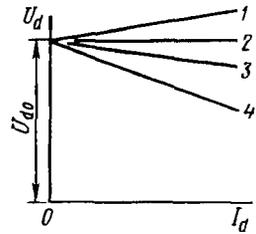


Рис. 12.2. Внешние характеристики ЭМУ

Важный параметр ЭМУ — *быстродействие*, которое определяется электромагнитной постоянной времени, т. е. скоростью протекания электромагнитных процессов, обусловленной индуктивностью обмоток электромашиного усилителя. Из всех обмоток электромашиного усилителя наибольшей индуктивностью обладает обмотка управления, и электромагнитные процессы в ней при изменении сигнала управления наиболее продолжительны. Поэтому быстродействие ЭМУ оценивают по электромагнитной постоянной времени этой обмотки $T_y = L_y/R_y$, где L_y и R_y — индуктивность (Гн) и активное сопротивление (Ом) обмотки управления. Для повышения быстродействия ЭМУ последовательно в цепь обмотки управления иногда включают добавочный резистор $R_{доб}$, тогда электромагнитная постоянная времени цепи управления уменьшается:

$$T_d = L_y / (R + R_{\text{доб}}). \quad (12.6)$$

Следует помнить, что с включением $R_{\text{доб}}$ увеличивается мощность управления

$$P_d = I_y^2 (R_y + R_{\text{доб}}), \quad (12.7)$$

а это ведет к уменьшению коэффициента усиления ЭМУ [см. (12.3)].

12.2. Электромашинные преобразователи

Для электропитания устройств автоматики и связи, навигационных и радиолокационных приборов применяют электромашинные (вращающиеся) преобразователи. Промышленностью изготавливаются электромашинные преобразователи постоянного тока низкого напряжения (12, 24 и 27 В) в постоянный ток более высокого напряжения (110, 220 В) или переменный ток требуемой частоты и напряжения, а также преобразователи частоты переменного тока (например, переменный ток частоты 50 Гц в переменный ток частот 200 или 400 Гц).

Наибольшее применение получили электромашинные преобразователи двигатель-генераторного типа, представляющие собой конструктивное соединение двух электрических машин — электродвигателя и генератора. Рассмотрим электромашинный преобразователь постоянного тока в переменный, который состоит из двигателя M постоянного тока смешанного возбуждения (рис. 12.3), рассчитанного на включение в сеть напряжением 27 В, и трехфазного синхронного генератора $СГ$ с возбуждением постоянными магнитами. Напряжение на выходе генератора 36 В частотой 400 Гц. Якорь двигателя и ротор генератора расположены на одном валу. При включении двигателя в сеть его якорь приводит во вращение ротор генератора, магнитное поле последнего становится вращающимся. Сцепляясь с обмоткой статора, это поле наводит в ней трехфазную ЭДС и на выходе генера-

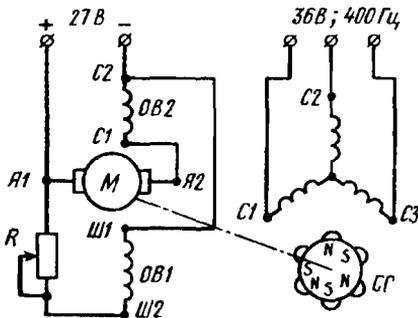


Рис. 12.3. Принципиальная схема двигатель-генераторного преобразователя

тора создается напряжение. Смешанное возбуждение двигателя постоянного тока осуществляется посредством параллельной $OB1$ и последовательной $OB2$ обмоток. Такой способ возбуждения обеспечивает постоянную частоту вращения якоря при изменениях нагрузки генератора. С помощью реостата R в цепи параллельной обмотки возбуждения двигателя регулируется частота вращения якоря n при необходимости

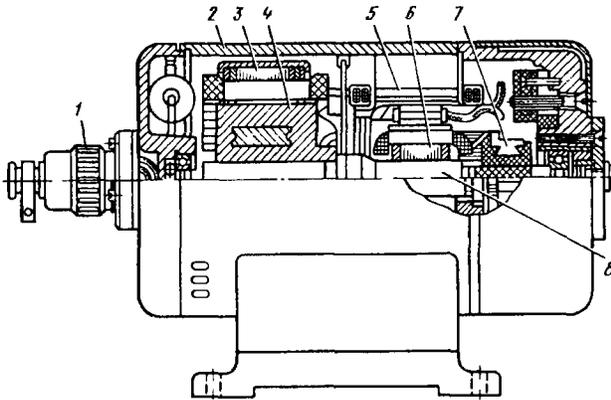


Рис. 12.4. Устройство двигатель-генераторного преобразователя

корректировки частоты тока синхронного генератора $f_r = p_r n / 60$.

Конструктивно электромашинный преобразователь двигатель-генераторного типа представляет собой агрегат, совмещающий в общем корпусе 2 (рис. 12.4) две электрические машины: двигатель постоянного тока и генератор переменного тока. Для двигателя этот корпус выполняет функцию станины, т. е. является элементом магнитопровода. На внутренней поверхности части корпуса, относящейся к двигателю, расположены два сердечника полюса 5 с катушками возбуждения. Внутри части корпуса, относящейся к генератору, расположен сердечник статора 3 с трехфазной распределенной обмоткой. На валу 8 преобразователя расположены: коллектор 7, сердечник якоря 6 с обмоткой, шестиполосный ротор 4 с постоянными магнитами. Присоединение преобразователя к внешней сети выполняется с помощью разъема 1.

Недостаток преобразователей двигатель-генераторного типа — низкий КПД, равный произведению КПД двигателя η_d на КПД генератора η_r : $\eta = \eta_d \cdot \eta_r$. Например, при $\eta_d = \eta_r = 0,6$ КПД преобразователя $\eta = 0,6 \cdot 0,6 = 0,36$.

Для получения переменного тока повышенной частоты (200, 400 или 500 Гц) применяют электромашинные преобразователи частоты. Обычно это преобразователи двигатель-генераторного типа, что позволяет получать требуемую частоту переменного тока, воздействуя на частоту вращения приводного двигателя. Если к преобразователю предъявляются повышенные требования по стабильности частоты тока и величины напряжения, то в качестве приводного применяют двигатель постоянного тока независимого возбуждения, обладающий хорошими регулировочными свойствами (см. § 6.9).

Часто процесс стабилизации выходных параметров преобразователя автоматизируют, включая в цепь возбуждения приводного двигателя элементы, регулирующие величину тока возбуждения в функции стабилизируемого параметра на выходе преобразователя. Однако наличие коллектора и устройств стабилизации усложняет стабилизатор, снижает его надежность. Поэтому, если к преобразователю не предъявляются повышенных требований к стабильности частоты и напряжения, то в качестве приводного применяют трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, обладающий достаточно жесткой скоростной характеристикой (см. § 3.7).

Контрольные вопросы

1. Объясните назначение и устройство ЭМУ поперечного поля. Каково назначение обмоток ОД, ОП и ОК?
2. Чем обеспечивается в ЭМУ большое значение коэффициента усиления?
3. Какие виды компенсации возможны в ЭМУ? Какую компенсацию обычно настраивают?
4. Почему электромашинные преобразователи двигатель-генераторного типа имеют низкий КПД?

Глава 13

Схемы управления электродвигателями в автоматических системах

■ 13.1. Электрические исполнительные механизмы

Наиболее разнообразно применение электромашинных элементов автоматики в *системах автоматического управления*. Например, система управления рулями самолета или судна или система подачи топлива для поддержания температуры нагрева какого-либо объекта и т. п. Непременным элементом такой системы является электрический исполнительный механизм (ЭИМ). Задача такого механизма — в соответствии с поступившим на его вход электрическим сигналом произвести перемещение регулирующего органа: заслонки, клапана, вентиля или другого органа, способного изменить количество энергии или рабочего вещества, поступающего на объект.

Для пояснения работы ЭИМ обратимся к его блок-схеме (рис. 13.1). Управляющий электрический сигнал U_y , созданный системой автоматического управления, поступает на вход блока управления БУ, который в соответствии с полярностью подает из сети питания на двигатель М. Двигатель преобразует электрическую энергию в механическую энергию вращения. Редуктор Р уменьшает частоту вращения, увеличивая соответственно вращающий момент до значения, достаточного для перемещения регулирующего органа РО, воздействующего на вентиль В, определяющий количество подаваемого рабочего вещества РВ (например, топлива) на объект. Одновременно блок датчиков обратной связи по положению ДОС вырабатывает сигнал обратной связи U_{oc} , соответствующий изменившемуся положению регулирующего органа РО, подает его на вход БУ и корректирует

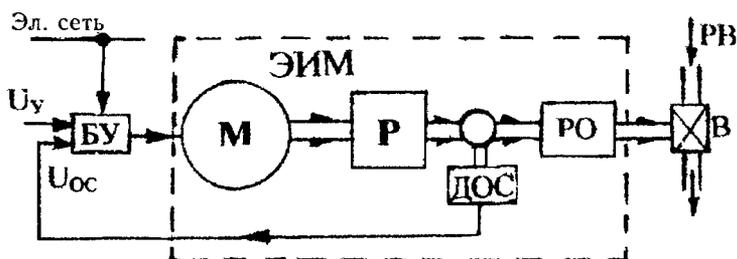


Рис. 13.1. Блок-схема электрического исполнительного механизма

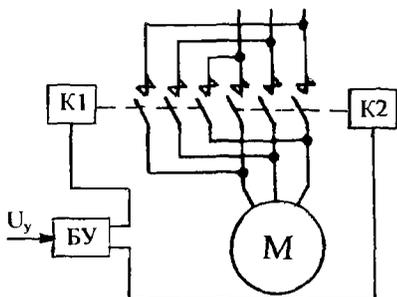


Рис. 13.2. Схема включения трехфазного асинхронного двигателя в ЭИМ постоянной скорости

работу двигателя М. Перемещение регулирующего органа РО может быть вращательным (несколько оборотов), поворотным (в пределах одного оборота) и прямоходным (поступательным).

Наибольшей надежностью и экономичностью обладают ЭИМ *постоянной скорости*, в которых в качестве двигателя М применен трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Как известно эти двигатели отличаются надежностью и экономичностью (см. гл. 3). Однако в

них затруднена регулировка частоты вращения. Но частоту вращения в ЭИМ постоянной скорости не регулируют.

На рис. 13.2 представлена схема включения этого двигателя. Помимо двигателя М в схему входит два контактора К1 и К2. При включении контактора К1 вращение двигателя происходит по часовой стрелке, а при включении К2 — против часовой стрелки. При поступлении сигнала U_y на вход блока БУ включается какой-либо контактор (в зависимости от полярности сигнала). После того как РО изменит положение вентиля В и сигнал обратной связи по положению поступит на вход БУ двигатель будет отключен. Для уменьшения выбега двигателя (вращения по инерции) ЭИМ снабжен электромагнитным тормозом. При поступлении нового сигнала на блок управления БУ двигатель вновь будет включен в сеть.

Однако режим постоянной скорости, хотя он прост, надежен и экономичен, не обеспечивает достаточной точности отработки сигнала U_y . Поэтому в системах, где требуется более высокая точность воспроизведения управляющего сигнала применяют ЭИМ *переменной скорости* в которых применяют исполнительные двигатели, допускающие регулирование частоты вращения (см. гл. 8). Применение малоинерционных исполнительных двигателей способствует повышению точности.

На рис. 13.3 показана схема включения двигателя в режиме переменной скорости. В схеме применен асинхронный исполнительный двигатель с конденсатором С в цепи возбуждения. Об-

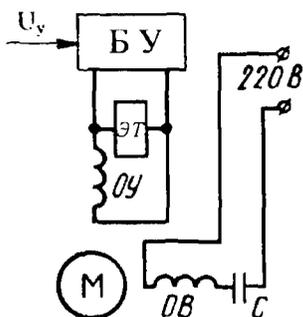


Рис. 13.3. Схема включения асинхронного исполнительного двигателя в ЭИМ переменной скорости

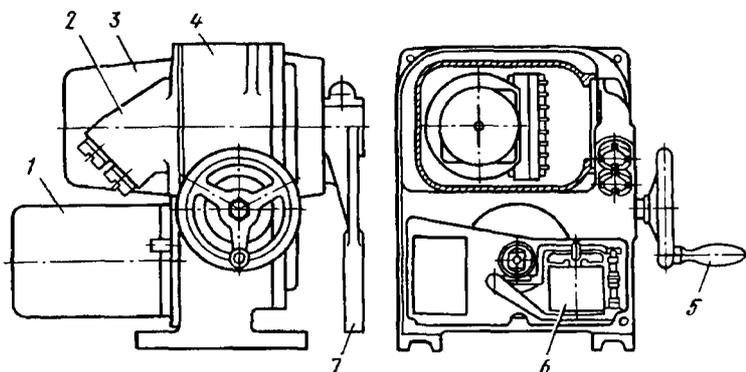


Рис. 13.4. Общий вид электрического исполнительного механизма

мотка управления подключена к блоку управления БУ. При поступлении на вход этого блока управляющего сигнала U_y начинается вращение двигателя, при этом частота вращения определяется уровнем сигнала, а направление вращения – его полярностью. При отсутствии сигнала U_y включается электромагнитный тормоз ЭТ, который фиксирует ротор двигателя, исключая его самопроизвольное вращение.

На рис.13.4 показан общий вид ЭИМ. Конструктивную основу механизма составляет редуктор, на корпусе 4 которого крепятся двигатель 1, блок датчиков обратной связи по положению 3, электромагнитный тормоз 6. Штурвал 5 служит для ручной установки регулирующего органа 7 механизма. Посредством штуцерного ввода 2 механизм включают в схему управления. В качестве датчика скорости используют тахогенератор (см. гл. 9).

Вид применяемого электродвигателя ЭИМ и схема его включения зависят от регулируемого объекта, требуемой точности воспроизведения управляющего сигнала, вида электроэнергии источника питания: постоянный ток, переменный ток промышленной частоты или другой частоты, например, 400 Гц.

■ 13.2. Схемы релейно-контакторного управления электродвигателями

Рассмотрим схему управления пуском трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором посредством нереверсивного контактора Л (рис. 13.5). При нажатии на кнопку «Пуск» замыкается цепь питания обмотки контактора Л, который срабатывает и силовыми контактами Л подключает к сети обмотку статора двигателя М. Одновременно замыкаются контакты 3—5 этого контактора, шунтируя кнопку «Пуск», чем обеспечивается питание обмотки контактора Л

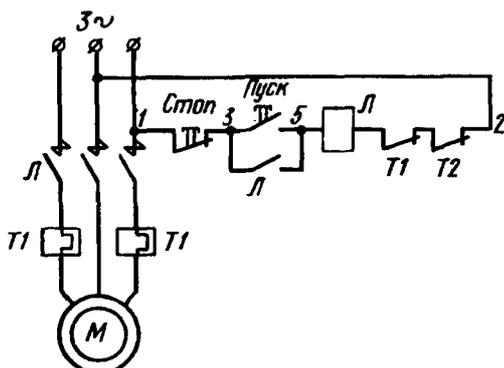


Рис. 13.5. Схема управления пуском трехфазного асинхронного двигателя

независимо от положения этой кнопки.

Двигатель отключается нажатием кнопки «Стоп». При этом замыкается цепь питания обмотки контактора \mathcal{L} , что приводит к размыканию всех его силовых контактов \mathcal{L} , отключающих обмотку статора двигателя от сети, и контактов \mathcal{L} , шунтирующих кнопку «Пуск». При отпуске кнопки «Стоп» цепь обмотки контактора остается разомкнутой.

В рассмотренной схеме управления применена защита двигателя от перегрузок посредством тепловых реле $T1$ и $T2$. Тепловое реле состоит из нагревательного элемента, включенного последовательно с силовым контактом \mathcal{L} , биметаллической пластины и размыкающих контактов, включенных последовательно в цепь питания обмотки линейного контактора \mathcal{L} . Если двигатель перегружен и потребляемый им ток превышает допустимое значение, то выделяемая нагревательным элементом теплота вызывает такой изгиб биметаллической пластины, при котором размыкаются контакты реле в цепи питания обмотки линейного контактора \mathcal{L} и двигатель отключается от сети.

На рис. 13.6 показана схема управления трехфазным асинхронным двигателем в функции времени. При нажатии на кнопку «Пуск» замыкается цепь питания обмотки линейного контактора \mathcal{L} , который срабатывает и своими силовыми контактами \mathcal{L} подключает двигатель M к источнику переменного тока и обмотку реле динамического торможения $РДТ$ к источнику постоянного тока. При включении контактора \mathcal{L} размыкаются его контакты 1—9 в цепи контактора торможения T и замыкаются контакты 3—5, шунтируя кнопку «Пуск». При срабатывании реле $РДТ$ замыкаются контакты 9—11 в цепи контактора торможения T , но этот контактор не срабатывает, так как цепь его обмотки остается разомкнутой контактами 1—9.

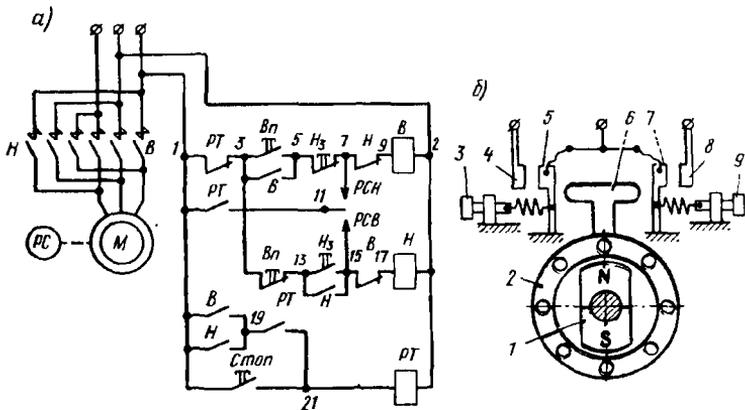


Рис. 13.6. Схема реверсивного управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором с торможением противовключением в функции скорости (а) и устройство реле скорости (б)

создают электромагнитный момент, под действием которого короткозамкнутая обмотка поворачивается и упором *б* воздействует на контакты 5 или 7, вызывая их замыкание с контактами 4 или 8 (в зависимости от направления вращения ротора двигателя).

Для включения двигателя на вращение «Вперед» (см. рис. 13.6, а) нажимают двоящую кнопку *Bn*. При этом контакты 3—5 замыкают цепь катушки контактора *B* и одновременно размыкаются контакты 3—13, исключая возможность случайного замыкания цепи катушки контактора *H*, что привело бы к короткому замыканию в силовой части схемы двигателя. При срабатывании линейного контактора *B* замыкаются контакты 3—5, шунтирующие кнопку *Bn*, и включаются силовые контакты *B*, которые присоединяют обмотку статора двигателя к сети. Одновременно размыкаются контакты 15—17, исключая возможность включения контактора *H*, и замыкаются контакты *B* (1—19). После пуска двигателя *M* срабатывает реле скорости *PC* и его средний контакт 11 замыкается с крайним контактом *PCB*. Для останова двигателя нажимают кнопку «*Стой*». При этом замыкаются контакты 1—21, подключающие обмотку реле торможения *PT*, при срабатывании которого размыкаются его контакты 1—3, отключающие катушку контактора *B*, замыкаются контакты 19—21 и 1—11 в цепи контактов реле скорости *PC* (11—15). Вращение ротора двигателя вызывает срабатывание реле скорости *PC*, и контакты 11—15 оказываются замкнутыми. Отключение контактора *B* вызывает замыкание контактов 15—17, что ведет к срабатыванию линейного контактора *H*. В результате силовые контакты *B* в цепи статора двигателя *M*

размыкаются, а силовые контакты H замыкаются и начинается торможение ротора двигателя противовключением. При уменьшении частоты вращения ротора до значения, равного 5—10% от номинального, момент на роторе реле уменьшается настолько, что замкнутая пара контактов $11—15$ под действием пружины (см. рис. 13.6, б) размыкается и процесс торможения прекращается, что исключает возможность возникновения реверса при торможении противовключением. Частоту вращения ротора, при которой наступает размыкание контактов реле, можно регулировать степенью сжатия пружин регулировочными винтами 3 и 9. Одновременно с отключением контактора H и прекращением питания двигателя M размыкаются контакты $1—19$, отключающие реле торможения PT , и замыкаются контакты $7—9$ в цепи питания обмотки контактора B . Контакты PT ($1—3$) замыкаются, а контакты PT ($1—11$) размыкаются. В результате схема оказывается подготовленной к следующему пуску двигателя.

Если после пуска двигателя в направлении вращения «Вперед» необходимо выполнить реверсирование, т. е. изменить направление вращения ротора, то кнопку «Стоп» нажимать не следует, а нужно нажать кнопку $Hз$ («Назад»). При этом размыкаются контакты $5—7$, отключающие контактор B , и замыкаются контакты $13—15$, подключающие обмотку контактора H к источнику питания, размыкаются контакты $7—9$ и B ($1—19$) и замыкаются контакты H ($1—19$) и $13—15$. Силовые контакты B разомкнутся, а силовые контакты H замкнутся. В результате ротор двигателя изменит направление вращения. Контакт 11 реле скорости PC разомкнется с контактом PCB и замкнется с контактом PCH . Для отключения и торможения двигателя, как и в предыдущем случае, достаточно нажать кнопку «Стоп».

Рассмотрим схему *неревверсивного управления пуском в функции времени двигателя постоянного тока параллельного возбуждения с динамическим торможением* (рис. 13.7). Пуск двигателя M в функции времени осуществляется с помощью реле ускорения $PY1$ и $PY2$. При кратковременном нажатии кнопки «Пуск» замыкается цепь питания обмотки контактора L , при сраба-

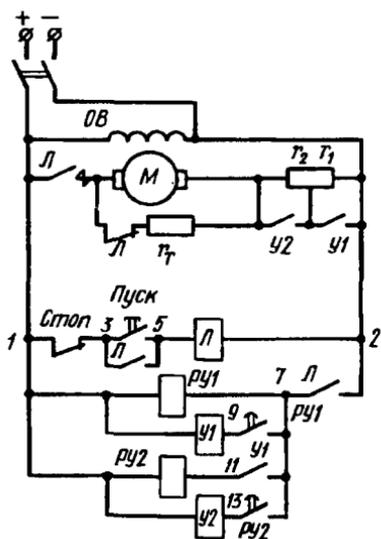


Рис. 13.7. Схема *неревверсивного управления пуском двигателя постоянного тока в функции времени с динамическим торможением*

тивании которого замыкаются контакты 3—5, размыкаются контакты L в цепи терморезистора r_1 , замыкаются контакты 7—2, включающие реле ускорения $PY1$, и замыкаются силовые контакты L , подключающие к сети постоянного тока двигатель M . При этом начинается пуск двигателя, в цепь обмотки якоря которого включены элементы пускового резистора $r_1 + r_2$ (первая ступень пуска). Реле ускорения $PY1$ с выдержкой времени замедления замыкает своими контактами 9—7 цепь питания обмотки контактора ускорения $Y1$, при срабатывании которого контакты $Y1$ шунтируют элемент пускового резистора r_1 . В итоге разгон двигателя продолжается с элементом пускового резистора r_2 в цепи якоря (вторая ступень пуска). Одновременно замыкаются контакты $11—7$, подключающие обмотку реле ускорения $PY2$, которое срабатывает и с заданной выдержкой времени своими контактами $13—7$ подключает обмотку контактора ускорения $Y2$ к источнику. Контактор срабатывает и своими контактами $Y2$ шунтирует элемент пускового резистора r_2 , двигатель оказывается включенным на полное напряжение сети. На этом процесс пуска заканчивается.

Для отключения двигателя необходимо кратковременно нажать кнопку «Стоп». При этом разомкнется цепь питания обмотки контактора L , который своими контактами отключит якорь двигателя и цепи обмоток всех ускоряющих реле и контакторов от источника питания. Следовательно разомкнутся контакты $Y1$ и $Y2$, шунтирующие элементы пускового резистора $r_1 + r_2$, и схема будет подготовлена к следующему пуску двигателя. Одновременно замкнутся контакты L в цепи резистора r_1 и двигатель перейдет в режим динамического торможения.

■ 13.3. Бесконтактное управление электродвигателями

Наибольшее применение в устройствах автоматики получили схемы бесконтактного управления электродвигателями, т. е. схемы в которых управление осуществляется без разрыва электрических цепей. Такое управление отличается более высокой надежностью по сравнению с контактными схемами, в которых возможно нарушение работы контактов (подгорание или залипание контактов). Основными управляющими элементами в этих схемах являются *тиристоры* (управляемые вентильные преобразователи). Так как эти устройства широко используются в схемах управления электродвигателями, то будет полезным познакомиться с принципом их работы.

Основным элементом тиристора является кремниевая пластина, имеющая четырехслойную структуру. При этом слои с электронной n -проводимостью чередуются со слоями с дырочной p -проводимостью.

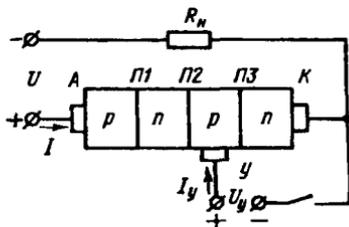


Рис. 13.8. Тиристор (принцип действия)

мостью (рис.13.8). Эти четыре слоя образуют три перехода: $П1$, $П2$ и $П3$. От среднего слоя p имеется вывод, который является *управляющим электродом* $У$. Если управляющий электрод не подключен, а к аноду A и катоду K приложено напряжение постоянного тока U прямой полярности («плюс» на аноде), то переходы $П1$ и $П3$ будут открыты, т. е. сопротивление их переходов $p-n$ «прямому» току

весьма мало. Что же касается перехода $П2$, то он включен в обратном направлении ($n-p$), поэтому его сопротивление значительно и практически все напряжение U окажется приложенным к переходу $П2$, и ток через диод проходить почти не будет ($i \sim 0$).

Если же к управляющему электроду $У$ и катоду K , приложить напряжение U_y («плюс» на управляющем электроде), то в переходе $П3$ возникнет ток управления I_y и появятся дополнительные носители зарядов. В итоге слой $n-p$ перехода $П2$ станет электропроводящим, т. е. тиристор откроется, и под действием напряжения U через все слои тиристора будет проходить ток I . После этого влияние управляющего электрода на электропроводность тиристора прекращается, т. е. тиристор работает как неуправляемый диод. Для того, чтобы ток через тиристор прекратился, необходимо либо разомкнуть электрическую цепь, либо подать на тиристор импульс обратного напряжения («минус» на аноде). Для повторного открывания тиристора необходимо вновь приложить некоторое напряжение между анодом и катодом и подать хотя бы кратковременно управляющий сигнал U_y между управляющим электродом и катодом. Таким образом, после того как тиристор открыт, его электропроводность не зависит от значения или полярности управляющего напряжения. Другими словами, тиристор имеет два устойчивых состояния закрытое и открытое. В этом отношении тиристоры аналогичны электромагнитным реле.

Тиристоры обладают высоким КПД, малой мощностью управления и неограниченным сроком службы. Для улучшения условий охлаждения тиристоры снабжаются ребристыми радиаторами. Если тиристор включить в цепь переменного тока, то при подаче положительного потенциала на управляющий электрод во время положительной полуволны напряжения тиристор откроется и в нем появится ток. После прекращения положительной полуволны напряжения переменного тока тиристор закроется. При следующей положительной полуволне для открывания тиристора необходимо вновь подать положительный потенциал на управляющий электрод. Таким образом,

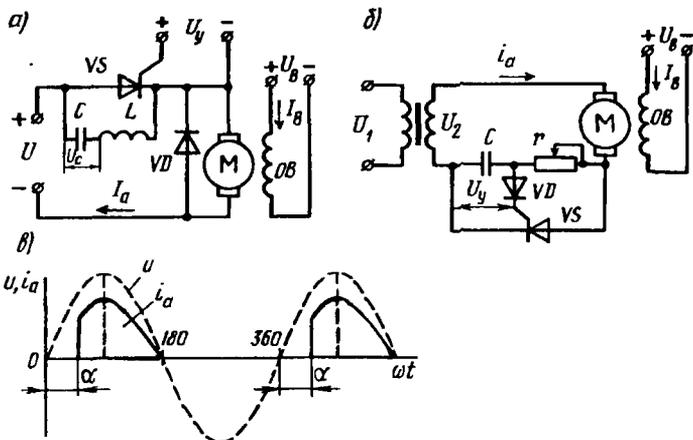


Рис. 13.9. Тиристорные схемы бесконтактного управления двигателями постоянного тока:

a — релейное управление, *б* — аналоговое управление, *в* — к пояснению принципа фазового управления тиристором

тиристоры можно применять как в цепях постоянного, так и в цепях переменного тока.

На рис. 13.9 показана тиристорная схема релейного управления двигателем постоянного тока независимого возбуждения. На тиристор *VS* подаются управляющие импульсы U_y . В момент поступления импульса тиристор *VS* открывается, к обмотке якоря двигателя *M* прикладывается напряжение U . Длительность включенного состояния тиристора *VS* за период следования импульсов U_y определяется параметрами *LC*-контура, [см. (6.28)]. Одновременно с включением тиристора *VS* происходит колебательный перезаряд конденсатора *C* по цепи конденсатор—тиристор—дроссель—конденсатор. Напряжение на выводах конденсатора изменяется от $+U_c$ до $-U_c$. Ток через тиристор *VS* равен сумме токов в цепи обмотки якоря двигателя I_a и перезаряда конденсатора I_c . При достижении напряжения $-U_c$ колебательный перезаряд конденсатора кратковременно продолжается по цепи конденсатор—дроссель—тиристор—конденсатор. В этом интервале времени ток через тиристор уменьшается до нуля, так как к тиристорному прикладывается отрицательное напряжение и он восстанавливает свои запирающие свойства. После выключения тиристора конденсатор по цепи якоря двигателя перезарядается до напряжения $+U_c$, а ток I_a замыкается по диоду *VD*. Схема работает в дискретном (релейном) режиме. Реверс двигателя возможен при изменении полярности напряжения U_b , питающего обмотку возбуждения *OB* двигателя.

На рис. 13.9, *б* показана схема тиристорного бесконтактного управления двигателем постоянного тока независимого возбуждения

при питании от источника переменного тока. Сущность этого принципа иллюстрирует рис. 13.9, в. Включение тиристора возможно только при положительном потенциале на управляющем электроде по отношению к катоду тиристора, т. е. только в момент положительных полупериодов напряжения u . При этом значение действующего значения тока через тиристор определяется углом регулирования α . Если $\alpha \approx 180^\circ$, то тиристор не включается, так как к нему подводится нулевое напряжение. Если угол $\alpha \ll 180^\circ$, то при положительных полупериодах напряжения U тиристор открывается и через него проходит ток i_a . По окончании положительного полупериода тиристор выключается ($i_a = 0$) (рис. 13.9, в). Обмотка возбуждения OB двигателя включена непосредственно в сеть постоянного тока на напряжение U_b (см. рис. 13.9, б). В схеме применена фазосдвигающая цепочка rc , где r — резистор переменного сопротивления. Значение управляющего сигнала U_y на управляющем электроде тиристора и его фазовый сдвиг относительно напряжения U_2 зависят от сопротивления резистора r . При полностью введенном сопротивлении r падение напряжения на нем составляет значительную часть напряжения U_2 . В результате напряжение на конденсаторе ($U_c = U_y$) недостаточно для отпирания тиристора, а фаза этого напряжения такова, что угол $\alpha \approx 180^\circ$. С уменьшением сопротивления r напряжение U_y возрастает, а угол α уменьшается, что приводит к включению тиристора при положительном полупериоде напряжения U_2 . При дальнейшем уменьшении сопротивления r ток через тиристор увеличивается, что ведет к росту частоты вращения якоря двигателя. Диод VD в цепи управления тиристора предназначен для того, чтобы исключить подачу отрицательного потенциала на управляющий электрод тиристора.

На рис. 13.10 показана схема электропривода с тиристорным преобразователем напряжения. Силовая часть схемы содержит два тиристора: $VS1$ и $VS2$, которые анодами подключены ко вторичным обмоткам трансформатора Tp , соединенным по нулевой схеме. Якорь двигателя постоянного тока включен между нулевой точкой трансформатора и катодами тиристоров через сглаживающий дроссель L , который уменьшает пульсации тока в цепи якоря двигателя. В схемах автоматического управления электроприводом изменение угла регулирования тиристором VS осуществляется блоком управления БУ. Импульсы прямоугольной формы U_{y1} и U_{y2} от блока управления БУ обеспечивают поочередное включение тиристоров в моменты положительных полупериодов напряже-

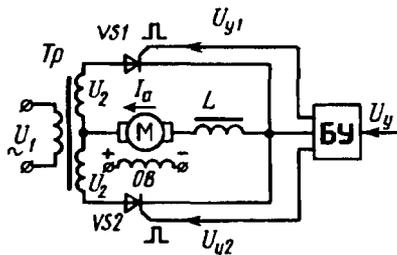


Рис. 13.10. Схема электропривода с неперевсннвым однофазным тиристорным преобразователем

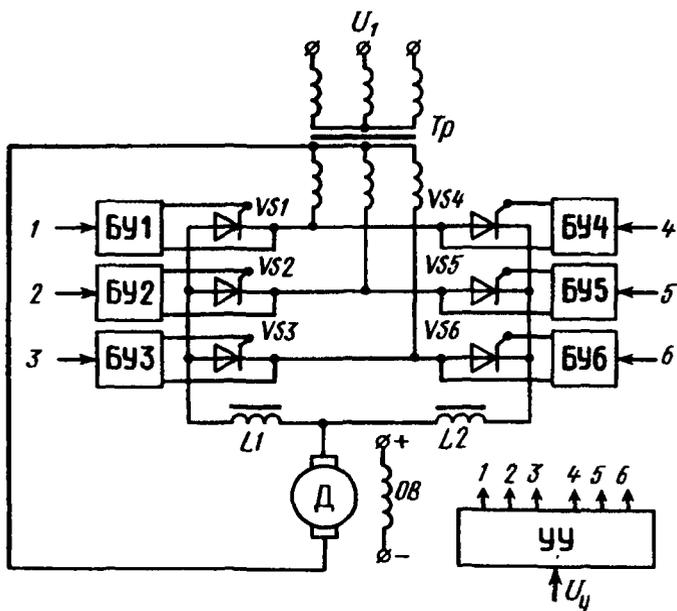


Рис. 13.11. Схема реверсивного тиристорного электропривода

ния на каждом из них. В зависимости от величины управляющего сигнала U_y , поданного на блок управления БУ, изменяется угол открывания тиристоров α . Это обеспечивает эксплуатацию электропривода в дискретном и аналоговом режимах.

При значительной мощности приводного двигателя используют схемы тиристорного управления на трехфазных трансформаторах, которые к тому же обеспечивают меньший уровень пульсаций выпрямленного тока в цепи якоря двигателя.

Для реверсивного управления электроприводом необходимо применять два комплекта нереверсивных тиристорных преобразователей. Включение того или иного комплекта преобразователей обеспечивает изменение направления тока I_a в цепи якоря двигателя M , а следовательно, его реверсирование (рис. 13.11).

В зависимости от значения и полярности сигнала U_y , подаваемого на вход управляющего устройства УУ, на блоки управления БУ левой (БУ1, БУ2, БУ3) или правой (БУ4, БУ5, БУ6) групп тиристоров поступают управляющие сигналы. Направление тока в обмотке якоря двигателя зависит от того, какая группа тиристоров открыта. Дроссели $L1$ и $L2$ сглаживают пульсации тока в цепи якоря и ограничивают уравнивательные токи, возникающие между двумя группами тиристоров.

Управление автоматизированным электроприводом посредством тиристорных преобразователей напряжения в настоящее время — основной вид регулирования. Такое управление используется во всех отраслях промышленности для электроприводов разной мощности: привода прокатных станов, экскаваторов, металлорежущих станков, лифтов и т. п. Отечественной промышленностью выпускаются комплексные тиристорные электроприводы, содержащие тиристорный преобразователь напряжения, электродвигатель, аппаратуру управления и защиты, источник напряжения возбуждения, датчик скорости. Например, электроприводы, серии КТЭ мощностью от 10 до 5000 кВт, серии ПТЗР мощностью от 0,6 до 11,3 кВт и др.

■ 13.4. Применение сельсинов в следящем электроприводе

Следящим электроприводом называют электрическую систему автоматического воспроизведения угловых перемещений посредством силового исполнительного механизма. Следящий электропривод — это замкнутая система с жесткой обратной связью по положению.

На рис. 13.12 показана схема следящего электропривода аналогового действия с сельсинным сравнивающим устройством, электромашиным усилителем и исполнительным двигателем постоянного тока независимого возбуждения. Ротор сельсина-датчика СД механически соединен с задающим устройством ЗУ, а ротор сельсина-приемника СП — с регулирующим органом РО объекта управления. Цепь обмотки якоря двигателя М включена в рабочую цепь ЭМУ поперечного поля. Обмотки управления ОУ1 и ОУ2 этого усилителя присоединены

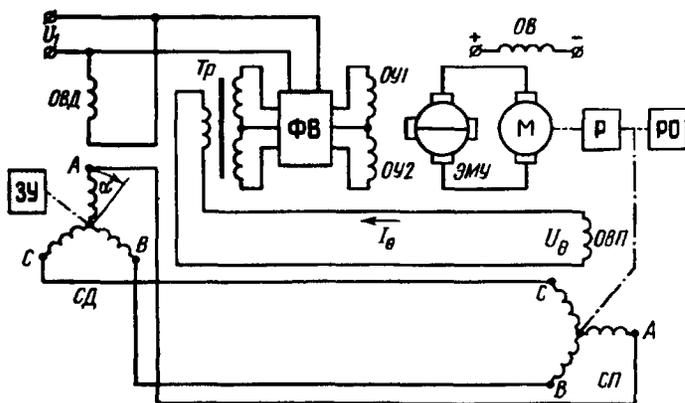


Рис. 13.12. Схема следящего электропривода аналогового действия

к фазочувствительному выпрямителю ΦB . Управление выпрямителем осуществляется через трансформатор Tr с нулевым выводом во вторичной обмотке. При повороте вала задающего устройства ZU на угол α по часовой стрелке изменяются значения ЭДС E_A, E_B, E_C в обмотке синхронизации сельсина-датчика CD . Это приведет к рассогласованию сельсинов CD и $СП$, в результате чего на выходе $ОВП$ приемника появится напряжение рассогласования U_B , которое создаст ток I_0 в первичной обмотке трансформатора Tr . При этом появится ток управления I_{y1} , в обмотке $ОУ1$ электромашинного усилителя и двигатель M придет во вращение. Через редуктор P это вращение передается на регулирующий орган PO управляемого объекта и на ротор сельсина-приемника $СП$. По мере поворота регулирующего органа PO и ротора приемника $СП$ напряжение рассогласования уменьшается, а при повороте на угол $\beta \approx \alpha$ напряжение рассогласования $U_0 \approx 0$. Такое изменение напряжения U_0 будет сопровождаться соответствующим уменьшением токов в обмотке управления и в рабочей цепи ЭМУ, а следовательно, и уменьшением тока в обмотке якоря двигателя. При этом частота вращения якоря будет постепенно уменьшаться, а при $U_0 \approx 0$ вращение якоря прекратится.

При повороте ротора CD на угол α против часовой стрелки напряжение рассогласования U_0 изменит фазу на 180° . При этом фазочувствительный выпрямитель ΦB создаст ток I_{y2} в обмотке управления $ОУ2$ электромашинного усилителя. Двигатель M повернется на угол рассогласования в заданном направлении, т. е. против часовой стрелки.

■ 13.5. Промышленные роботы

Электрический привод в промышленных роботах за последние годы получает все более широкое применение, что объясняется рядом его преимуществ по сравнению с гидро- и пневмоприводами. Электроприводы просты в эксплуатации, имеют более низкий уровень шума, в них отсутствуют трубопроводы.

В промышленных роботах применяются электроприводы дискретного (релейного) и непрерывного действия. Электроприводы дискретного действия, не регулируемые в процессе работы, наиболее просты и состоят из редуктора и электродвигателя, включаемого в сеть посредством реле или пускателя. Предельное положение выходного органа робота с таким приводом фиксируется либо упором (если двигатель допускает работу на «упор»), либо конечным выключателем. Передача движения от двигателя к рабочему органу осуществляется через редуктор, понижающий частоту вращения и увеличиваю-

щий вращающий момент, а иногда еще и преобразующий вращательное движение в поступательное посредством передачи «винт-гайка» или реечной. В электроприводах непрерывного действия применяют электродвигатели с регулированием их частоты вращения, например двигатели постоянного тока независимого возбуждения, обладающие хорошими регулировочными свойствами. Одна из специфических особенностей работы электропривода промышленного робота — переменная нагрузка на валу двигателя. Чтобы скорость перемещения исполнительного органа робота в условиях переменной нагрузки оставалась практически неизменной, необходимо применять в электроприводе либо двигатель с жесткой механической характеристикой, либо использовать в схеме управления двигателем блок стабилизации частоты вращения. Высокая точность перемещения исполнительного органа обеспечивается применением в электроприводе шаговых двигателей (см § 8.7). В этом случае точность воспроизведения роботом заданных движений определяется величиной шага двигателя.

Для промышленных роботов, предназначенных для автоматизации операций по перемещению деталей и узлов, целесообразно применять модули. Модули можно устанавливать отдельно или компоновать из них несложные конструкции промышленных роботов. Показательные примеры таких модулей — модуль «мотор-палец» и модуль «мотор-рука». Эти модули просты по конструкции и состоят из асинхронного двигателя, совмещенного с редуктором, и выходного штока, совершающего поступательное движение.

Модуль «мотор-палец» (рис. 13.13) выполняется на усилии 50—200 Н с ходом штока 15—50 мм. Статор 3 этого модуля имеет обмотку, при включении которой в сеть создается вращающееся магнитное поле. На наружной поверхности полого вала 1 расположен сердечник ротора 2 с короткозамкнутой обмоткой. На внутренней поверхности вала 1 и наружной поверхности штока 4 имеется резьба. При этом

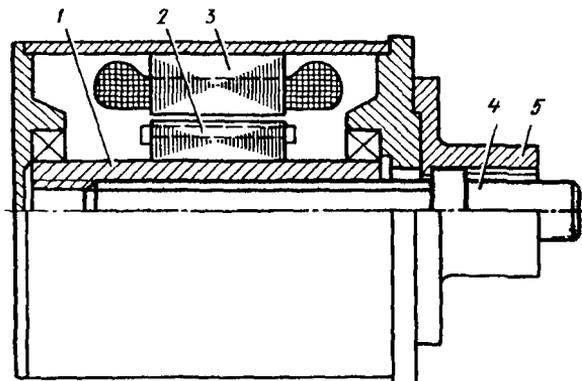


Рис. 13.13. Устройство модуля «мотор-палец»

штока 4 ввинчивается в полый вал 1, как винт в гайку. При включении двигателя вращательное движение ротора 2 преобразуется в поступательное движение штока 4. Внутреннее отверстие фланца 5 имеет шпоночный паз, предотвращающий вращение штока 4. При подходе штока к крайним положениям усилие на штоке демпфируется пружинами, расположенными либо непосредственно в модуле, либо вне его. Если необходимо зафиксировать крайние положения штока, то применяют концевые выключатели, располагаемые вне модуля. На базе модуля «мотор-палец» при добавлении зажимного механизма, приводимого в действие выходным штоком модуля, изготавливается захватное устройство, предназначенное для захвата детали при ее транспортировке. Например, в захватном клиновом механизме (рис. 13.14) деталь 5 захватывается клещами 4, которые приводятся в действие клином 2, закрепленным на штоке 1 модуля «мотор-палец». Для захвата детали штоки 1 подаются вперед и клин 2, входя между роликами 3, зажимает клещами 4 деталь 5. При движении штока назад клин освобождает клещи, которые под действием пружины разжимаются.

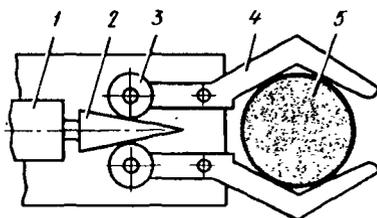


Рис. 13.14. Устройство захватного клинового механизма

Модуль «мотор-рука» выполняется на рабочие усилия до 10 кН с ходом штока до 800 мм. Принцип действия этого модуля аналогичен действию модуля «мотор-палец», но конструктивно отличается из-за значительного усилия и большого хода штока. Ротор 3 трехфазного асинхронного двигателя (рис. 13.15) через редуктор 4 вращает ходовой винт 7. Гайка 6 перемещается по ходовому винту и приводит в

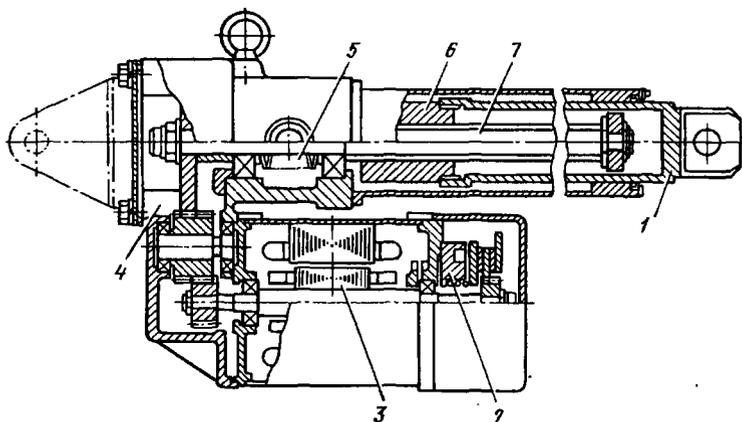


Рис. 13.15. Устройство модуля «мотор-рука»

поступательное движение выходной штока 1. Тарельчатые пружины 5 предотвращают удары штока в его крайних положениях. Тормоз 2 фрикционного типа с электромагнитным управлением предотвращает свободный выбег ротора при отключении двигателя. Концевые выключатели располагают вне модуля.

Для дальнейшего усовершенствования модуля в нем применяют два двигателя на разные частоты вращения или один, двухскоростной двигатель: при приближении штока к заданной точке двигатель переключается на меньшую частоту вращения, что способствует более точной фиксации штока в заданной точке. Для переключения двигателя с одной частоты вращения на другую используют путевой переключатель. Перспективно также использовать в электроприводе промышленных роботов линейные асинхронные двигатели (см. § 3.10).

Применение двигателей постоянного тока в электроприводе промышленных роботов обеспечивает хорошую регулируемость частоты вращения и вращающего момента. Особый интерес представляют двигатели, возбуждаемые постоянными магнитами (см. § 6.2), имеющие наиболее простую схему соединения и минимальные габариты. Применение двигателей постоянного тока имеет еще и то преимущество, что позволяет выполнить промышленный робот автономным, снабдив его аккумуляторной батареей.

■ 13.6. Лентопротяжные механизмы

Лентопротяжный механизм — это основной узел устройств для записи и воспроизведения информации посредством магнитной ленты. Работа лентопротяжного механизма (ЛПМ) связана с протяжкой и перемоткой магнитной ленты (МЛ). Эти операции в ЛПМ выполняются посредством электродвигателей малой мощности.

Лентопротяжный механизм должен обеспечивать стабильную скорость протяжки магнитной ленты и минимальный ее износ. Наиболее полно эти требования выполняются в конструкциях ЛПМ с индивидуальными двигателями на каждом вращающемся элементе.

На рис. 13.16 показан простейший *лентопротяжный механизм с разомкнутой петлей магнитной ленты*. Принимающая кассета 1 приводится во вращение двигателем М1, подающая кассета 8 приводится двигателем М2, ведущий (центральный) вал 2 приводится двигателем М3. По тракту движения МЛ размещены магнитные головки: стирающая 3, записи 4 и воспроизведения 5.

В режиме записи или воспроизведения МЛ прижимается к ведущему валу 2 прижимным роликом с электромагнитом 6. В режимах перемотки и останова МЛ отжимается роликом с электромагнитом 7.

Ведущий вал должен протягивать МЛ по тракту со стабильной скоростью, не зависящей от натяжения ленты и напряжения сети. По-

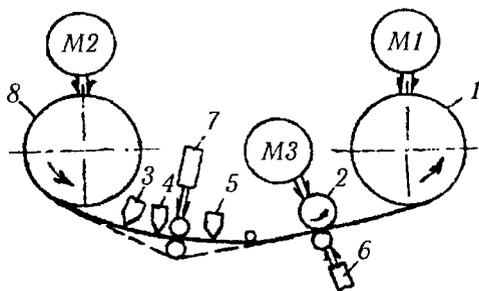


Рис. 13.16. Лентопротяжный механизм с открытой петлей МЛ

этому для привода этого вала применяют синхронный или гистерезисный двигатели (см. гл. 5). Однако стабильность протяжки ленты в этом ЛПМ полностью не обеспечивается из-за возможного проскальзывания МЛ между ведущим валом и прижимным роликом, так как слишком мала поверхность механического сцепления ведущего вала с МЛ.

В качестве двигателей для привода подающей и принимающих кассет обычно применяют асинхронные конденсаторные двигатели (см. гл. 4).

Более надежным и стабильным является ЛПМ с замкнутой петлей МЛ (рис.13.17). Здесь ведущий вал 1, приводимый двигателем М1, имеет механический контакт с МЛ как с ее набегающей стороны (прижимной ролик 2), так и с ее сбегающей стороны (прижимной ролик 3). Благодаря этому увеличивается площадь сцепления ленты с ведущим валом 1, что снижает проскальзывание МЛ. И кроме того обеспечивается изоляция участка МЛ от механических возмущений, создаваемых двигателем М2 подающей кассеты 4 и двигателя М3 принимающей кассеты 5. Все это способствует повышению стабильности ЛПМ рабочих режимах.

Другим средством стабилизации протяжки МЛ является применение вакуумного ведущего вала. В этом случае прижатие МЛ к поверхности вала обеспечивается за счет вакуума, создаваемого внутри полого ведущего вала, поверхность которого в зоне контакта с МЛ имеет отверстия. Такой ЛПМ помимо перечисленных выше двигателей имеет еще и двигатель привода вакуумного насоса.

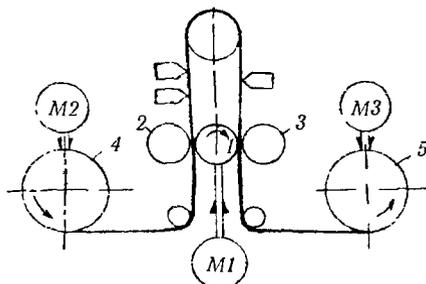


Рис. 13.17. Лентопротяжный механизм с замкнутой петлей МЛ

На рис.13.18 представлен ЛПМ с вакуумными ко-

лонками, который имеет два ведущих вала, приводимыми во вращение двигателями $M1$ и $M2$. Считывание информации происходит при движении МЛ в обоих направлениях, а поэтому двигатели ведущих валов $M1$ и $M2$ и двигатели кассет $M3$ и $M4$ должны быть реверсивными. Магнитные головки стирания 3, записи 4 и считывания 5 расположены на участке магнитной ленты между двумя ведущими вакуумными валами 1 и 2. Во время перемотки МЛ внутри ведущих валов вместо вакуума создается избыточное давление, благодаря чему через щели в верхней части этих валов выходит воздух. В итоге между валами и МЛ создается *воздушная подушка*, что существенно уменьшает износ МЛ при ее перемотке. В вакуумных колонках 6 и 7 создается разрежение, и часть МЛ втягивается во внутрь этих колонок. Этим достигается независимость движения МЛ от инерционности двигателей $M3$ и $M4$, приводящих во вращение кассеты 8 и 9. Вакуумный насос 10 приводится в действие двигателем $M5$.

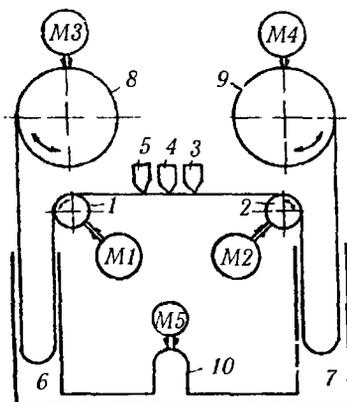


Рис. 13.18. Лентопротяжный механизм с вакуумными колонками

В отличие от аудио магнитофонов и накопителей, где запись на МЛ ведется вдоль ее оси, в *видеомагнитофонах* запись на МЛ ведется под некоторым углом к ее оси. При этом воспроизведение записи осуществляется двумя диаметрально расположенными относительно друг друга магнитными головками. Эти головки расположены на диске, который вращается с частотой равной частоте смены кадров в телевизоре, что соответствует движению МЛ со скоростью 5 м/с.

Катушки с МЛ расположены в видеокассете, которая автоматиче-

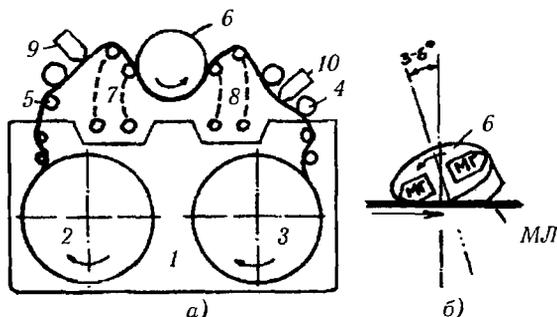


Рис. 13.19. Лентопротяжный механизм видеомагнитофона

ски втягивается в ЛПМ, а затем также автоматически выполняется заправка МЛ специальным механизмом заправки.

В кассете 1 (рис. 13.19, а) расположены подающая 2 и принимающая 3 катушки с МЛ. Для привода этих кассет используются коллекторные двигатели постоянного тока (см. 6.10). Протяжка МЛ по тракту осуществляется ведущим валом 4 с прижимным роликом (на рис. не показан). Стабильное натяжение МЛ обеспечивается рычагом 5, удерживаемым пружиной. Привод ведущего вала осуществляется коллекторным двигателем постоянного тока с жесткой механической характеристикой, обеспечивающей стабильную частоту вращения.

Две считывающие головки находятся на диске 6, приводимым во вращение бесконтактным двигателем постоянного тока (см. 6.13). Ось диска 6 отклонена от вертикали на угол 3—6° (рис. 13.19, б). Это позволяет располагать кассету 1 горизонтально, хотя запись на МЛ сделана на наклонных дорожках.

Заправка МЛ для плотного ее прилегания к магнитным головкам выполняется элементами 7 и 8, приводимыми в движение коллекторным двигателем постоянного тока. Траектория перемещения этих элементов показана пунктирными линиями. Головка 9 — стирающая, а головка 10 — звукозаписывающая.

Применяемые для привода элементов ЛПМ двигатели, в силу его конструктивной компоновки, должны иметь конструктивное уплотненное исполнение. Имеется в виду, что диаметр такого двигателя должен быть в несколько раз больше его осевого размера. С этой целью указанные двигатели делают дисковыми с печатной обмоткой якоря и с осевым возбуждением. Такой двигатель подробно рассмотрен на стр. 161, а его устройство показано на рис. 8.5.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение электрических исполнительных механизмов в системах автоматического управления?
2. Какая разница между ЭИМ, работающих в режимах постоянной и переменной скорости?
3. Объясните назначение контактов Л в схемах рис.13.5 и рис. 13.6.
4. Объясните назначение и устройство тепловых реле в схемах включения двигателей.
5. Как работает реле скорости в схеме рис.13.6?
6. Объясните принцип работы тиристора.
7. Какова разница в работе схем релейного и аналогового управления?
8. Объясните работу схемы следящего электропривода.
9. В чем достоинства ЛПТ с замкнутой петлей МЛ?
10. Объясните назначение вакуумных колонок в ЛПМ.
11. Почему в ЛПМ видеоманитофона считывающие головки расположены на вращающемся диске?
12. Сколько двигателей в ЛПМ видеоманитофона?

Заключение

Достижения науки и техники, обусловленные ускорением научно-технического прогресса, способствуют постоянному совершенствованию автоматических систем и в первую очередь их элементной основы. Это относится и к электрическим машинам для автоматических устройств. Совершенствование электромашинных элементов автоматики ведется по двум направлениям. Во-первых, применяют более качественные магнитные и электроизоляционные материалы, что способствует повышению технико-экономических показателей электрических машин. Например, изготовление магнитопроводов электрических машин из магнитомягких материалов, обладающих высокой магнитной проницаемостью: холоднокатаных электротехнических сталей, железоникелевых и железо-кобальтовых сплавов. Либо применение в машинах с постоянными магнитами магнитотвердых материалов с использованием редкоземельных элементов. Магнитная энергия постоянных магнитов из таких материалов почти в 6 раз выше, чем у магнитов из сплава типа альнико.

Во-вторых, создаются новые, более рациональные конструкции электрических машин. Опыт эксплуатации электромашинных элементов автоматики показал, что наиболее перспективны конструкции, не имеющие скользящих электрических контактов — бесконтактные машины. Такие машины, обладая высокой надежностью и стабильностью характеристик, способны работать при значительных колебаниях внешних воздействий (температуры, влажности, вибраций и т. п.) во взрывоопасных и пожароопасных средах, в условиях вакуума и при больших динамических перегрузках. Перечисленные свойства позволяют успешно эксплуатировать такие машины в транспортных средствах и других аппаратах. Примером бесконтактных электрических машин, которые успешно применяются в современной автоматике, являются бесконтактные сельсины, бесконтактные двигатели постоянного тока.

Актуальной остается задача создания еще более совершенных конструкции малоинерционных исполнительных двигателей. Перспективными в этом отношении являются конструкции двигателей постоянного тока с печатными обмотками якоря (с полым и дисковым якорями).

Продолжаются работы по совершенствованию тихоходных электродвигателей, позволяющих исключить механический редуктор из исполнительного механизма.

Совершенствование существующих и создание новых конструкций электрических машин для автоматических устройств, надежных в работе и имеющих более высокие технико-экономические показатели, — важная задача в развитии комплексной автоматизации технологических и производственных процессов в промышленности, на транспорте, сельском хозяйстве, в бытовых устройствах.

Список литературы

1. Балагуров В А и др Бесконтактные двигатели постоянного тока с постоянными магнитами/ В А Балагуров, В М Гридин, В К Лозенко —М. Энергия. 1975
2. Брускин Д Э и др Электрические машины и микромашины/ Д Э Брускин, А Е Зорохович, В С Хвостов —М Высшая школа. 1981
3. Ижеля Г И и др Линейные асинхронные двигатели/ Г И Ижеля, С А Ребров, А Г Шаповаленко. —Киев: Техника, 1975
4. Кацман М М Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам и электроприводу —М Высшая школа. 2001
5. Кацман М М Электрические машины —М Высшая школа 2001
6. Кацман М М Электрические машины и электропривод автоматических устройств —М Высшая школа, 1987
7. Кацман М М, Юферов Ф М Электрические машины автоматических систем —М Высшая школа. 1979
8. Келич Ю М Электрические микродвигатели для видеокomпьютерной техники —М МТУС. 1996
9. Келич Ю М Электромеханические и магнитные элементы систем автоматизации —М Высшая школа. 1991
10. Свечарник Д В Линейный электропривод —М Энергия. 1979
11. Специальные электрические машины/ А И Бертинов, Д А Брут, С Р Мизюрин Под ред А И Бертинова —М Энергоиздат. 1982
12. Справочник по средствам автоматизации/ Под ред В Э Низэ и И В Антика —М Энергоатомиздат. 1983
13. Уруцев В В Электрические микромашины автоматических устройств —Л Энергия. 1976
14. Электрические двигатели с гладким якорем для систем автоматизации/ Под ред Ю К Васильева —М Энергия, 1979
15. Юферов Ф М Электрические машины автоматических устройств —М Высшая школа. 1976

Предметный указатель

- Автотрансформатор 26
 - с переменным коэффициентом трансформации 28
- Асимметрия нулевых точек 223
- Бегунок** 63
- Быстродействие 151
- Вал карданный** 146
- Величины базовые 152
- Вентилятор центробежный 44
- Гиродвигатель** 61
- Датчик положения ротора 136
 - ЭДС Холла 136
- Двигатель асинхронный трехфазный 42
 - – конденсаторный 72
 - – линейный 62
 - – однофазный 67
 - – с внешним ротором 60
 - – с полым ротором 171
 - – с экранированными полюсами 77
 - бесконтактный постоянного тока 135
 - волновой 146
 - исполнительный 151
 - – асинхронный 40
 - – постоянного тока 102
 - – шаговый 172
 - коллекторный 102
 - – с постоянными магнитами 111
 - – универсальный 133
- Двигатель независимого возбуждения 122
 - параллельного 122
 - последовательного 130
 - редукторный 141
 - реактивно гистерезисный 99
 - с гладким якорем 162
 - с дисковым якорем 161
 - с катящимся ротором 143
 - с полым якорем 171
 - синхронный с электромагнитным возбуждением 81
 - – гистерезисный 95
 - – реактивный 92
- Диаграммы МДС сельсина приемника 204
- Запаздывание магнитное 95
- Зона нечувствительности тахогенератора 189
- Изменение напряжения трансформатора** 20
- Импульсы двухполярные шагового двигателя 173
 - однополярные 173
 - – Индуктор 68
- Искажение импульсов 31
- Искрение на коллекторе 117
- Колебания ротора** 84
- Кольца контактные 45, 83
- Коллектор 103
 - на пластмассе 108
- Коммутатор 135
- Коммутация 117
- Конденсатор проходной 119
 - пусковой 74
 - рабочий 73
- Коэффициент нагрузки 18
 - полезного действия 16, 49, 85, 119
 - редукции скорости 143, 147
 - стабилизации напряжения 35
 - трансформации 11
 - управления 129
 - усиления мощности 229
- Магнесин** 213
- Магнитопровод трансформатора 13
- Машины электрические информационные 179
- Метод амперметра 222
 - вольтметра 222
- Момент гистерезисный 95
 - входа в синхронизм 84
 - выхода из синхронизма 88
 - инерции якоря 158
 - синхронизирующий 199
 - – удельный 201
 - тормозной 89

- электромагнитный 50, 86, 114
- – максимальный 52
- – основной 86
- – пусковой 52
- – реактивный 86
- Мощность возбуждения 155, 158
- полезная 50
- потребляемая 50
- Мощность управления 155
- электромагнитная 50, 114

Напряжение выходное удельное 206
Нейтраль геометрическая 103

- физическая 116

Несимметрия выходной характеристики 189

Обмотка демпферная 84

- пусковая 69, 84
- рабочая 69
- ротора короткозамкнутая 43
- – фазная 45
- стабилизирующая 123
- статора 43

Огонь круговой 117

Опыт короткого замыкания 20

- холостого хода 19

Охлаждение естественное 44

Ошибка несимметрии 180

- статическая 176

Параметры относительные исполнительного двигателя 152

Петля гистерезиса 97

Пик-трансформатор 29

Погрешность амплитудная 183, 190

- воспроизведения синусоидальной зависимости 222
- угла рассогласования 202
- фазовая 183
- частотная 184

Поле магнитное бегущее 63

- – круговое 70
- – пульсирующее 71
- эллиптическое 71

Помехи радиоприему 118

Постоянная времени электромеханическая 159

Потери в асинхронном двигателе 48

- в двигателе постоянного тока 119
- в синхронном двигателе 85
- в трансформаторе 17

Поток вынужденного намагничивания 25

Продолжительность включения относительная 60

Противо-ЭДС 113

Пульсация выходного напряжения 191

Пуск двигателя асинхронного однофазного 69

- – постоянного тока 121
- – синхронного 83
- – с постоянными магнитами 90

Пусковые свойства двигателя трехфазного асинхронного 56

Реакция якоря 114

Реостат пусковой 45, 121

- регулировочный 45

Регулирование частоты вращения 57, 126, 132

- – – импульсное 59, 129
- – – частотное 58

Режим генераторный коллекторной машины 103

- двигательный 105
- динамический 202
- квазистатический 177
- переходный 177
- статический 177, 200
- установившийся 177

Ротор короткозамкнутый 41

Ротор секционированный СРД 93

- фазный 45

Самовентиляция 43

Самоход 151

- параметрический 166
- технологический 167

Свойства пусковые асинхронного двигателя 56

Сельсин 193

- бесконтактный 209
- дифференциальный 212
- контактный 207

Сердечник ротора 43

- статора 42
- якоря 107

Симметрирование вторичное 221

- первичное 219

Система индикаторная 195

- трансформаторная 203

Скольжение 42

- критическое 52
- номинальное 42

Стабилизатор напряжения ферромагнитный 36

- феррорезонансный 37
- Статор 43
 - сборный 106
 - шихтованный 106
- Степень возбужденности двигателя 90
- Тахогенератор 179
 - асинхронный 180
 - постоянного тока 179
 - синхронный 178
- Трансформатор 10
 - вращающийся 218
 - линейный 224
 - синусно-косинусный 220
 - импульсный 30
 - многообмоточный 23
 - однофазный 10
 - силовой 10
 - трехфазный 21
- Угол рассогласования 195
- Удвоитель частоты 32
- Управление амплитудное 165
 - амплитудно-фазовое 166
 - полюсное 156
 - фазовое 166
 - якорное 153
- Уравнение выходной характеристики 188
 - МДС трансформатора 16
 - механической характеристики 156
- Уравнение регулировочной характеристики 154
 - токов трансформатора 16
 - асинхронного двигателя 47
- Уравнения напряжений асинхронного двигателя 47
 - трансформатора 15
- Характеристика внешняя трансформатора 21
 - механическая асинхронного двигателя 51
 - двигателя постоянного тока 125
 - регулировочная 127, 168
- Характеристики внешние ЭМУ 231
 - рабочие асинхронного двигателя 55
 - угловые синхронного двигателя 87
- Частота вращения синхронная 40
 - скольжения 42
 - приемистости 174
- Шаг угловой 172
- Шунты магнитные 190
- ЭДС вращения 181
 - остаточная 206
 - трансформаторная 133. 182
- Электродвигатели силовые 39
- Электромашинные элементы автоматики 150

Оглавление

Предисловие.....	3
Введение.....	4
В.1. Принцип действия и назначение электрических машин.....	4
В.2. Классификация электрических машин.....	5
Раздел 1. ТРАНСФОРМАТОРЫ.....	9
Глава 1. Силовые трансформаторы.....	10
1.1. Назначение и принцип действия трансформатора.....	10
1.2. Устройство трансформаторов.....	12
1.3. Основные соотношения в трансформаторе.....	14
1.4. Потери и КПД трансформатора.....	17
1.5. Опыты холостого хода и короткого замыкания трансформаторов.....	18
1.6. Изменение вторичного напряжения трансформатора.....	20
1.7. Трехфазные и многообмоточные трансформаторы.....	21
1.8. Трансформаторы для выпрямительных устройств.....	23
1.9. Автотрансформаторы.....	26
Глава 2. Трансформаторные устройства специального назначения.....	29
2.1. Пик-трансформаторы.....	29
2.2. Импульсные трансформаторы.....	30
2.3. Умножители частоты.....	32
2.4. Стабилизаторы напряжения.....	35
Раздел 2. СИЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ.....	39
Глава 3. Трехфазные асинхронные двигатели.....	40
3.1. Принцип действия трехфазного асинхронного двигателя.....	40
3.2. Устройство трехфазных асинхронных двигателей.....	42
3.3. Основы теории трехфазного асинхронного двигателя.....	46
3.4. Потери и коэффициент полезного действия асинхронного двигателя.....	48
3.5. Электромагнитный момент асинхронного двигателя.....	50
3.6. Влияние напряжения сети и активного сопротивления обмотки ротора на механическую характеристику.....	53
3.7. Рабочие характеристики трехфазных асинхронных двигателей.....	55
3.8. Пусковые свойства трехфазных асинхронных двигателей.....	56
3.9. Регулирование частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей.....	57
3.10. Асинхронные двигатели специального назначения.....	61
Глава 4. Однофазные и конденсаторные асинхронные двигатели.....	67
4.1. Принцип действия однофазного асинхронного двигателя.....	67
4.2. Пуск однофазного асинхронного двигателя.....	69
4.3. Конденсаторные асинхронные двигатели.....	72
4.4. Включение трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть.....	75
4.5. Однофазные асинхронные двигатели с экранированными полюсами.....	77

Глава 5. Синхронные двигатели.....	80
5.1. Принцип действия и устройство синхронного явнополюсного двигателя с электромагнитным возбуждением.....	80
5.2. Пуск синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением.....	83
5.3. Потери, КПД и электромагнитный момент синхронного двигателя.....	85
5.4. Синхронные двигатели с постоянными магнитами.....	88
5.5. Синхронные реактивные двигатели.....	91
5.6. Синхронные гистерезисные двигатели.....	95
5.7. Реактивно-гистерезисные двигатели.....	99
Глава 6. Коллекторные машины.....	102
6.1. Принцип действия машины постоянного тока.....	102
6.2. Устройство силового двигателя постоянного тока.....	106
6.3. Основные уравнения двигателя постоянного тока.....	113
6.4. Реакция якоря.....	114
6.5. Коммутация в двигателях постоянного тока и способы ее улучшения.....	117
6.6. Помехи радиоприему и способы их подавления.....	118
6.7. Потери и КПД двигателей постоянного тока.....	119
6.8. Пуск двигателей постоянного тока.....	121
6.9. Двигатели независимого и параллельного возбуждения.....	122
6.10. Регулирование частоты вращения двигателей независимого и параллельного возбуждения.....	126
6.11. Двигатели последовательного возбуждения.....	130
6.12. Универсальные коллекторные двигатели.....	133
6.13. Бесконтактные двигатели постоянного тока.....	135
Глава 7. Двигатели с электромагнитной и электромеханической редукией скорости.....	141
7.1. Двигатели с электромагнитной редукией скорости.....	141
7.2. Двигатели с электромеханической редукией скорости.....	142
Раздел 3. ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ .	150
Глава 8. Исполнительные двигатели.....	151
8.1. Назначение исполнительных двигателей и предъявляемые к ним требования.....	151
8.2. Исполнительные двигатели постоянного тока.....	152
8.3. Устройство исполнительных двигателей постоянного тока.....	158
8.4. Асинхронные исполнительные двигатели.....	164
8.5. Характеристики асинхронного исполнительного двигателя.....	167
8.6. Устройство асинхронных исполнительных двигателей.....	169
8.7. Шаговые исполнительные двигатели.....	172
Глава 9. Тахогенераторы.....	179
9.1. Общие сведения.....	179
9.2. Тахогенераторы переменного тока.....	180
9.3. Тахогенераторы постоянного тока.....	187
Глава 10. Электрические машины синхронной связи.....	193
10.1. Общие сведения.....	193
10.2. Индикаторная система дистанционной передачи угла.....	194
10.3. Трансформаторная система дистанционной передачи угла.....	203
10.4. Конструкция сельсинов.....	207
10.5. Дифференциальный сельсин.....	212
10.6. Магнесины.....	213

Глава 11. Вращающиеся трансформаторы.....	216
11.1. Назначение и устройство вращающихся трансформаторов.....	216
11.2. Синусно-косинусный вращающийся трансформатор.....	218
11.3. Линейный вращающийся трансформатор.....	224
11.4. Трансформаторная система дистанционной передачи угла на вращающихся трансформаторах.....	225
Глава 12. Электромашинные усилители и преобразователи.....	228
12.1. Электромашинные усилители	228
12.2. Электромашинные преобразователи.....	232
Глава 13. Схемы управления электродвигателями в автоматических системах.....	235
13.1. Электрические исполнительные механизмы	235
13.2. Схемы релейно-контакторного управления электродвигателями.....	237
13.3. Бесконтактное управление электродвигателями.....	242
13.4. Применение сельсинов в следящем электроприводе	247
13.5. Промышленные роботы.....	248
13.6. Лентопротяжные механизмы.....	251
Заключение.....	255
Список литературы.....	257
Предметный указатель	258

Учебное издание

Марк Михайлович Кацман

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ
АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ**

Учебное пособие

Художник *В.Г. Купцов*
Верстка *С.Ч. Соколовский*

ЛР № 071629 от 20 04 98
Издательский дом «ФОРУМ»
101831, Москва-Центр, Колпачный пер., д. 9а
Тел /факс (095) 916-08-30
E-mail forum-books@mail.ru

ЛР № 070824 от 21 01 93
Издательский Дом «ИНФРА-М»
127214, Москва, Дмитровское ш., 107
Тел (095) 485-70-63, 485-71-77
Факс (095) 485-53-18 Робофакс (095) 485-54-44
E-mail books@infra-m.ru
<http://www.infra-m.ru>

Подписано в печать 29 10 2001 Формат 60x90/16
Печать офсетная. Усл. печ. л. 17.0 Тираж 6000 экз. Заказ 4104119

Отпечатано с готовых диапозитивов
на ФГУИПП «Нижполиграф»
603006, Нижний Новгород, ул. Варварская, 32

ISBN 5-8199-0027-8



9 785819 900277



ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ИНФРА-М»

ПРЕДСТАВЛЯЕТ
УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КНИЖНЫЙ МАГАЗИН
МЕЛКООПТОВОЙ И РОЗНИЧНОЙ ТОРГОВЛИ

- БОЛЕЕ 35000 НАИМЕНОВАНИЙ ЛИТЕРАТУРЫ
- БОЛЕЕ 5000 КАНЦЕЛЯРСКИХ ТОВАРОВ
- СОВРЕМЕННЫЙ ТОРГОВЫЙ ЗАЛ
- СКИДКИ ДО 15%
- ПРИНИМАЮТСЯ К ОПЛАТЕ КРЕДИТНЫЕ КАРТЫ

ДЕЛОВОЙ КНИЖИ ДОМ

ХУДОЖЕСТВЕННАЯ ЛИТЕРАТУРА
ДЕТСКАЯ ЛИТЕРАТУРА
УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА
ДОМ БЫТ ДОСУГ
ПРИРОДНЫЕ НАУКИ
ТЕХНИКА
МЕДИЦИНА
ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ
ОБЩЕСТВЕННЫЕ НАУКИ
ПРАВО
ЭКОНОМИКА
ИСКУССТВО

АДРЕС: М. «ПРОЛЕТАРСКАЯ», УЛ. МАРКСИСТСКАЯ, Д.9

ЧАСЫ РАБОТЫ:
С 10.00 ДО 20.00,
В ВОСКРЕСЕНЬЕ ДО 19.00
БЕЗ ПЕРЕРЫВА НА ОБЕД

ТЕЛЕФОНЫ:
(095) 270-52-17
(095) 270-52-18
(095) 270-52-19