

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
ФГБОУ ВО КОСТРОМСКАЯ ГСХА

Кафедра электроснабжения

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Учебное пособие
для студентов направлений подготовки 35.03.06 «Агроинженерия»,
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
очной и заочной форм обучения

КАРАБАЕВО
Костромская ГСХА
2015

УДК 621.313

ББК 31.261

Э 45

Составитель: ст. преподаватель кафедры электроснабжения Костромской ГСХА М.С. Ётов.

Рецензент: к.т.н., доцент кафедры электропривода и электротехнологии Костромской ГСХА Ф.А. Новожилов.

Рекомендовано к изданию методической комиссией факультета электрификации и автоматизации сельского хозяйства, протокол № ___ от ___ января 2015 г.

Э 45 **Электрические машины** : учебное пособие для студентов направлений подготовки 35.03.06 «Агроинженерия», 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» очной и заочной форм обучения / сост. М.С. Ётов. — Караваево : Костромская ГСХА, 2015. — 140 с.

Издание содержит основные понятия, принцип действия, характеристики, классификацию электрических машин, богатый иллюстративный материал, контрольные и экзаменационные вопросы, тесты, а также список использованных источников.

Учебное пособие предназначено для студентов 2-3 курсов, обучающихся по направлениям подготовки 35.03.06 «Агроинженерия», 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» очной и заочной форм обучения.

УДК 621/313

ББК 31/261

© ФГБОУ ВО Костромская ГСХА, 2015

© М.С. Ётов, составление, 2015

© РИО Костромской ГСХА, оформление, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Классификация электрических машин по мощности	6
Основные понятия	6
1. Трансформаторы	8
1.1. Назначение и области применения трансформаторов	8
1.2. Принцип действия трансформаторов	8
1.3. Устройство трансформаторов	10
1.4. Параллельная работа трансформаторов	19
1.5. Автотрансформаторы	23
1.6. Трансформаторы для дуговой электросварки	27
1.7. Измерительные трансформаторы тока и напряжения	29
2. Асинхронные двигатели	36
2.1. Назначение и области применения асинхронных двигателей	36
2.2. Устройство асинхронных двигателей	36
2.3. Принцип действия асинхронного двигателя	42
2.4. Потери и коэффициент полезного действия асинхронного двигателя	43
2.5. Механические характеристики асинхронного двигателя	46
2.6. Рабочие характеристики асинхронного двигателя	48
2.7. Пуск двигателей с фазным ротором	50
2.8. Пуск двигателей с короткозамкнутым ротором	54
2.9. Асинхронные двигатели с улучшенными пусковыми характеристиками	57
2.10. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей	61
2.11. Принцип действия и пуск однофазного асинхронного двигателя	67
2.12. Асинхронные конденсаторные двигатели	72
2.13. Работа трехфазного АД от однофазной сети	74
2.14. Индукционный регулятор напряжения и фазорегулятор	76
2.15. Асинхронный преобразователь частоты	77
2.16. Линейные асинхронные двигатели	78
2.17. Однослойные обмотки статора	82
3. Синхронные машины	88
3.1. Назначение и области применения синхронных машин	88
3.2. Принцип действия синхронного генератора	88
3.3. Характеристики синхронного генератора	92
3.4. Потери и КПД синхронных машин	96
3.5. Пуск синхронных двигателей	99
3.6. U-образные кривые и рабочие характеристики синхронного двигателя	101
3.7. Синхронный компенсатор	105

4. Коллекторные машины	110
4.1. Назначение и области применения коллекторных машин	110
4.2. Принцип действия генератора и двигателя постоянного тока.....	110
4.3. Устройство коллекторной машины постоянного тока	113
4.4. Способы возбуждения машин постоянного тока	118
4.5. Причины, вызывающие искрение на коллекторе	119
4.6. Круговой огонь по коллектору.....	122
4.7. Радиопомехи от коллекторных машин и способы их подавления	123
4.8. Основные понятия коллекторных двигателей	124
4.9. Пуск коллекторного двигателя.....	127
4.10. Универсальные коллекторные двигатели	129
Вопросы для самоподготовки	133
Список использованных источников.....	135
Приложение	136

ВВЕДЕНИЕ

Электрическими машинами называют электромеханические преобразователи, в которых электрическая энергия преобразуется в механическую или механическая — в электрическую энергию. В зависимости от рода отдаваемого или потребляемого тока электрические машины разделяются на машины переменного и постоянного тока, которые могут использоваться в качестве двигателей, генераторов или их комбинации.

По принципам создания вращающего момента электрические машины делятся на синхронные, асинхронные и постоянного тока.

В *синхронных машинах* частота вращения вала синхронизирована с частотой вращения электромагнитного поля, создающего вращающий момент. В синхронной машине поле возбуждения создается обмоткой, расположенной на роторе и питающейся постоянным током. Обмотка статора соединяется с сетью переменного тока. Обращенная схема, когда обмотка возбуждения расположена на статоре, встречается редко. В синхронной машине обмотка, в которой индуцируется ЭДС и протекает ток нагрузки, называется обмоткой якоря, а часть машины с этой обмоткой называется якорем. Часть машины, на которой расположена обмотка возбуждения, называется индуктором. Синхронные машины применяются в качестве генераторов и двигателей.

Условием работы *асинхронной машины* является неравенство частот вращения электромагнитного поля статора и ротора. В асинхронной машине поле создается в обмотке статора и взаимодействует с током, наводимым в обмотке ротора. Среди асинхронных машин коллекторными являются однофазные двигатели малой мощности. Асинхронные машины применяются в основном в качестве двигателей.

Главной особенностью *машины постоянного тока* является наличие коллектора и скользящего контакта между обмоткой якоря и внешней электрической цепью. Машина постоянного тока по своему конструктивному выполнению сходна с обращенной синхронной машиной, у которой обмотка якоря расположена на роторе, а обмотка возбуждения — на статоре. Благодаря своим хорошим регулировочным свойствам двигатели постоянного тока нашли широкое распространение в промышленности. Они могут работать в качестве и генераторов, и двигателей.

Классификация электрических машин по мощности

Машины большой мощности:

- коллекторные машины мощностью более 200 кВт;
- синхронные генераторы мощностью более 100 кВт;
- синхронные двигатели мощностью более 200 кВт;
- асинхронные двигатели мощностью более 100 кВт при напряжении более 1 000 В.

Машины средней мощности:

- коллекторные машины мощностью 1...200 кВт;
- синхронные генераторы мощностью до 100 кВт, в том числе высокоскоростные мощностью до 200 кВт;
- асинхронные двигатели мощностью 1...200 кВт;
- асинхронные машины мощностью 1...400 кВт при напряжении до 1 000 В, в том числе двигатели единых серий от 0,25 кВт.

К группе машин малой мощности относятся электрические машины, не входящие в первые две группы:

- двигатели постоянного тока (коллекторные и универсальные);
- асинхронные двигатели,
- синхронные двигатели и др.

Основные понятия

Коэффициент полезного действия (КПД) — отношение полезной (отдаваемой) мощности и затраченной (подводимой):

- для генераторов — отношение активной электрической мощности, отдаваемой в сеть, к затраченной механической мощности;
- для электродвигателей — отношение полезной механической мощности на валу, кВт, к активной подводимой электрической мощности, кВт.

Коэффициент активной мощности для машин переменного тока — отношение активной мощности к полной:

- для генераторов — отношение отдаваемой активной электрической мощности, кВт, к полной отдаваемой электрической мощности, кВ·А;
- для электродвигателей — отношение активной потребляемой электрической мощности, кВт, к полной потребляемой электрической мощности, кВ·А;

Пусковой ток (начальный пуск) — установившийся ток, потребляемый двигателем при неподвижном роторе и питании от сети с номинальным напряжением и частотой (I_n — пусковой ток).

Кратность начального пускового тока — отношение начального пускового тока к номинальному току.

Номинальный вращающий момент — вращающий момент на валу электродвигателя, соответствующий номинальной мощности и номинальной частоте вращения.

Начальный пусковой момент — вращающий момент, развиваемый двигателем при неподвижном роторе и начальном пусковом токе.

Минимальный вращающий момент — наименьшее значение вращающего момента, развиваемого двигателем при номинальных напряжении и частоте сети в диапазоне изменения частоты вращения от нуля до значения, соответствующего максимальному моменту.

Максимальный вращающий момент — наибольшее значение вращающего момента, развиваемого двигателем при номинальных напряжении и частоте сети.

Относительная продолжительность включения (ПВ) — отношение длительности работы двигателя при нагрузке, включая пуск, к длительности рабочего цикла, выраженное в процентах.

1. ТРАНСФОРМАТОРЫ

1.1. Назначение и области применения трансформаторов

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две (или более) индуктивно связанные обмотки и предназначенное для преобразования посредством явления электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока.

В общем случае вторичная система переменного тока может отличаться от первичной любыми параметрами: значениями напряжения и тока, числом фаз, формой кривой напряжения (тока), частотой. Наибольшее применение в электротехнических установках, а также в энергетических системах передачи и распределения электроэнергии имеют силовые трансформаторы, посредством которых изменяют значения переменного напряжения и тока. При этом число фаз, форма кривой напряжения (тока) и частота остаются неизменными.

В зависимости от назначения трансформаторы разделяют на силовые трансформаторы общего назначения и трансформаторы специального назначения. *Силовые трансформаторы общего назначения* применяются в электроснабжении, а также в различных электроустановках для получения требуемого напряжения. *Трансформаторы специального назначения* характеризуются разнообразием рабочих свойств и конструктивного использования. К этим трансформаторам относятся разделительные, сварочные трансформаторы, трансформаторы для устройств автоматики, выпрямительные, измерительные трансформаторы, автотрансформаторы и т.д.

1.2. Принцип действия трансформаторов

Простейший силовой трансформатор состоит из магнитопровода (сердечника), выполненного из ферромагнитного материала (обычно листовая электротехническая сталь), и двух обмоток, расположенных на стержнях магнитопровода (рис. 1, а). Одна из обмоток, которую называют первичной, присоединена к источнику переменного тока Γ на напряжение U_1 . К другой обмотке, называемой вторичной, подключен потребитель Z_H . Первичная и вторичная обмотки трансформатора не имеют электрической связи друг с другом, и мощность из одной обмотки в другую передается электромагнитным путем. Магнитопровод, на котором расположены эти обмотки, служит для усиления индуктивной связи между обмотками.

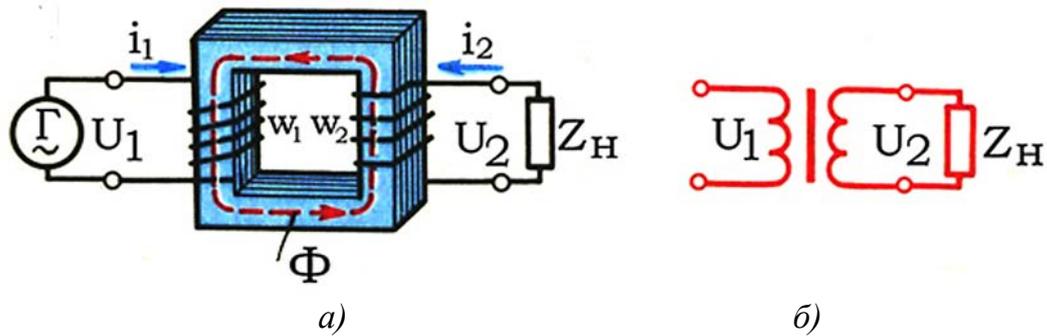


Рис. 1. Электромагнитная (а) и принципиальная (б) схемы трансформатора

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки к источнику переменного напряжения в витках этой обмотки протекает переменный ток, который создает в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ . замыкаясь в магнитопроводе, этот поток сцепляется с обеими обмотками (первичной и вторичной) и индуцирует в них ЭДС:

– в первичной обмотке ЭДС самоиндукции

$$e_1 = -w_1 \left(\frac{d\Phi}{dt} \right); \quad (1.1)$$

– во вторичной обмотке ЭДС взаимной индукции

$$e_2 = -w_2 \left(\frac{d\Phi}{dt} \right), \quad (1.2)$$

где w_1 и w_2 — число витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

При подключении нагрузки Z_H к выводам вторичной обмотки трансформатора под действием ЭДС e_2 в цепи этой обмотки создается ток i_2 , а на выводах вторичной обмотки устанавливается напряжение U_2 . В повышающих трансформаторах $U_2 > U_1$, а в понижающих $U_2 < U_1$.

Из уравнений (1.1) и (1.2) видно, что ЭДС e_1 и e_2 , наводимые в обмотках трансформатора, отличаются друг от друга лишь за счет разного числа витков w_1 и w_2 в обмотках, поэтому, применяя обмотки с требуемым соотношением витков, можно изготовить трансформатор на любое отношение напряжений.

Обмотку трансформатора, подключенную к сети с более высоким напряжением, называют *обмоткой высшего напряжения* (ВН); обмотку, присоединенную к сети меньшего напряжения, — *обмоткой низшего напряжения* (НН).

На рис. 1, б показано изображение однофазного трансформатора на принципиальных электрических схемах.

Трансформаторы обладают свойством обратимости, один и тот же трансформатор можно использовать в качестве повышающего и понижающего. Но обычно трансформатор имеет определенное назначение: либо он повышающий, либо — понижающий.

Трансформатор — это аппарат переменного тока. Если же его первичную обмотку подключить к источнику постоянного тока, то магнитный поток в магнитопроводе трансформатора также будет постоянным как по величине, так и по направлению ($d\Phi/dt = 0$), поэтому в обмотках трансформатора не будет наводиться ЭДС, а следовательно, электроэнергия из первичной цепи не будет передаваться во вторичную.

Классифицируют трансформаторы по нескольким признакам:

- по назначению — силовые общего назначения, силовые специального назначения, импульсные, для преобразования частоты и т. д.;
- по виду охлаждения с воздушным (сухие трансформаторы) и масляным (масляные трансформаторы) охлаждением;
- по числу трансформируемых фаз — однофазные и трехфазные;
- по форме магнитопровода — стержневые, броневые, бронестержневые, тороидальные;
- по числу обмоток на фазу — двухобмоточные, многообмоточные.

1.3. Устройство трансформаторов

Современный трансформатор состоит из различных конструктивных элементов: магнитопровода, обмоток, вводов, бака и др. Магнитопровод с насаженными на его стержни обмотками составляет активную часть трансформатора. Остальные элементы трансформатора называют неактивными (вспомогательными) частями. Рассмотрим подробнее конструкцию основных частей трансформатора.

Магнитопровод. Магнитопровод в трансформаторе выполняет две функции: во-первых, он составляет магнитную цепь, по которой замыкается основной магнитный поток трансформатора, а во-вторых, он является основой для установки и крепления обмоток, отводов, переключателей. Магнитопровод имеет шихтованную конструкцию, т.е. он состоит из тонких (обычно толщиной 0,5 мм) стальных пластин, покрытых с двух сторон изолирующей пленкой (например, лаком). Такая конструкция магнитопровода обусловлена стремлением ослабить вихревые токи, наводимые в нем переменным магнитным потоком, а следовательно, уменьшить величину потерь энергии в трансформаторе.

Силовые трансформаторы выполняются с магнитопроводами трех типов: стержневого, броневоего и бронестержневого.

В магнитопроводе стержневого типа (рис. 2, а) вертикальные стержни 1, на которых расположены обмотки 2, сверху и снизу замкнуты ярмами 3. На каждом стержне расположены обмотки соответствующей фазы и проходит магнитный поток этой фазы: в крайних стержнях — потоки Φ_A и Φ_C , а в среднем стержне — поток Φ_B . На рис. 2, б показан внешний вид магнитопровода. При этом стержни имеют ступенчатое сечение, вписываемое в круг диаметром d (рис. 3).

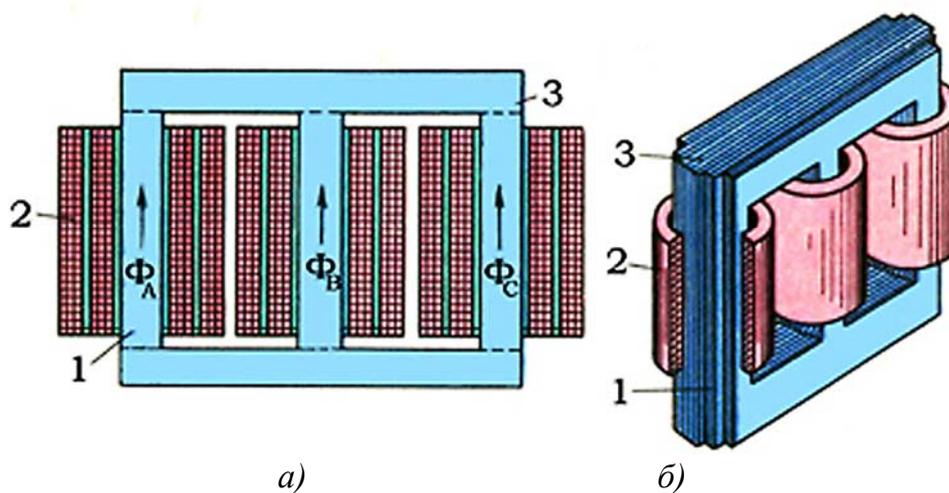


Рис. 2. Магнитопровод трехфазного трансформатора стержневого типа с обмотками

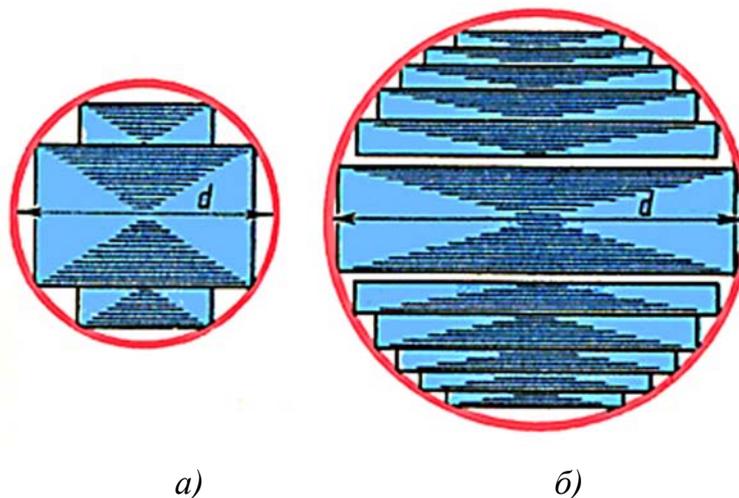


Рис. 3. Форма сечения стержней:
а — трансформаторов малой и средней мощности;
б — трансформаторов большой мощности

Стержни трансформаторов большой мощности имеют много ступеней, что обеспечивает лучшее использование площади круга внутри обмотки. Для лучшей теплоотдачи иногда между отдельными пакетами стержня оставляют воздушные зазоры шириной 5-6 мм, служащие вентиляционными каналами.

Магнитопровод броневое типа представляет собой разветвленную конструкцию со стержнем и ярами, частично прикрывающими («бронирующими») обмотки (рис. 4). Магнитный поток в стержне магнитопровода броневое типа в два раза больше, чем в ярах, каждое из которых имеет сечение, вдвое меньшее сечения стержня. Из-за технологической сложности изготовления магнитопроводы броневое типа не получили широкого распространения, их применяют лишь в силовых трансформаторах весьма малой мощности (радиотрансформаторы).

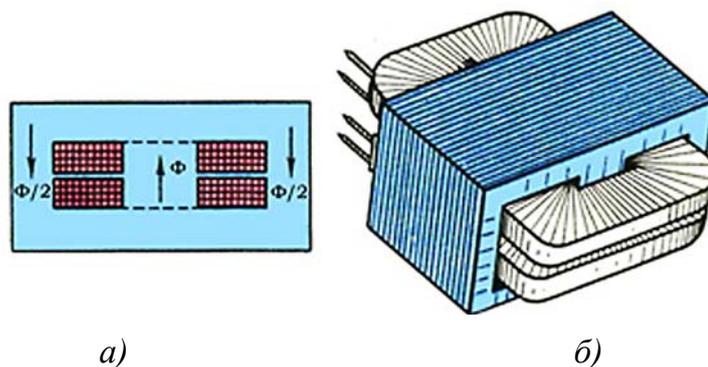


Рис. 4. Однофазный трансформатор броневое типа:
а — устройство; б — внешний вид

В трансформаторах большой мощности применяют бронестержневую конструкцию магнитопровода (рис. 5), которая хотя и требует несколько повышенного расхода электротехнической стали, но позволяет уменьшить высоту магнитопровода ($H_{bc} < H_c$), а следовательно, и высоту трансформатора. Это имеет важное значение при транспортировке трансформаторов по железной дороге.

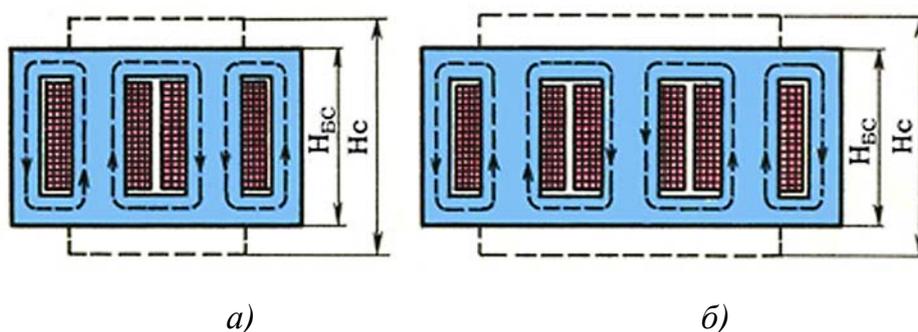


Рис. 5. Магнитопроводы бронестержневых трансформаторов:
а — однофазного; б — трехфазного

По способу сочленения стержней с ярами различают стыковую и шихтованную конструкции стержневого магнитопровода (рис. 6).

При стыковой конструкции (рис. 6, а) стержни и ярма собирают отдельно, насаживают обмотки на стержни, а затем приставляют верхнее и нижнее ярма, заранее проложив изолирующие прокладки между стыкующимися элементами, с целью ослабления вихревых токов, возникающих при взаимном перекрытии листов стержней и ярм. После установки двух ярм всю конструкцию прессуют и стягивают вертикальными шпильками. Стыковая конструкция хотя и облегчает сборку магнитопровода, но не получила распространения в силовых трансформаторах из-за громоздкости стяжных устройств и необходимости механической обработки стыкующихся поверхностей для уменьшения магнитного сопротивления в месте стыка.

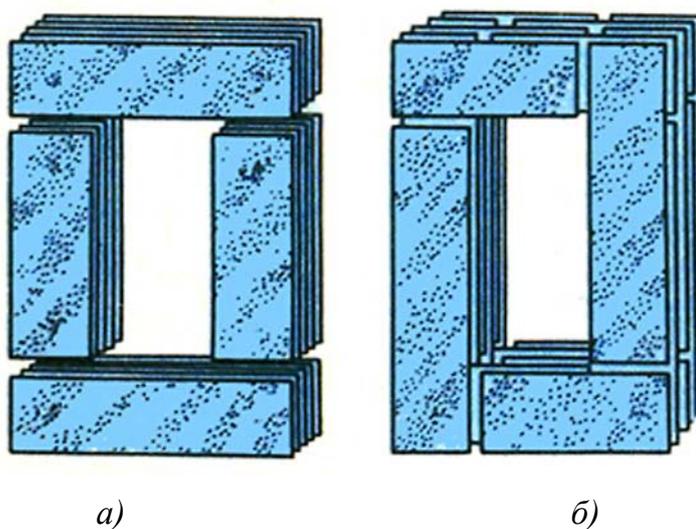


Рис. 6. Стыковая (а) и шихтованная (б) конструкции магнитопроводов

Шихтованная конструкция магнитопроводов силовых трансформаторов показана на рис. 6, б, когда стержни и ярма собирают слоями в переплет. Обычно слой содержит 2-3 листа. В настоящее время магнитопроводы силовых трансформаторов изготавливают из холоднокатаной электротехнической стали, у которой магнитные свойства вдоль направления прокатки листов лучше, чем поперек. Поэтому при шихтованной конструкции в местах поворота листов на 90° появляются «зоны несовпадения» направления прокатки с направлением магнитного потока. На этих участках наблюдаются увеличение магнитного сопротивления и рост магнитных потерь. С целью ослабления этого явления применяют для шихтовки пластины (полосы) со скошенными краями. В этом случае вместо прямого стыка (рис. 7, а) получают косой стык (рис. 7, б), у которого «зона несовпадения» гораздо меньше.

Недостатком магнитопроводов шихтованной конструкции является некоторая сложность сборки, так как для насадки обмоток на стержни приходится расшихтовывать верхнее ярмо, а затем после насадки обмоток вновь его зашихтовывать.

Стержни магнитопроводов во избежание распушения опрессовывают (скрепляют). Делают это обычно наложением на стержень бандажа из стеклоленты или стальной проволоки. Стальной бандаж выполняют с изолирующей пряжкой, что исключает создание замкнутых стальных витков на стержнях. Бандаж накладывают равномерно, с определенным натягом. Для опрессовки ярм 3 и мест их сочленения со стержнями 1 используют ярмовые балки 2, которые в местах, выходящих за крайние стержни (рис. 8), стягивают шпильками.

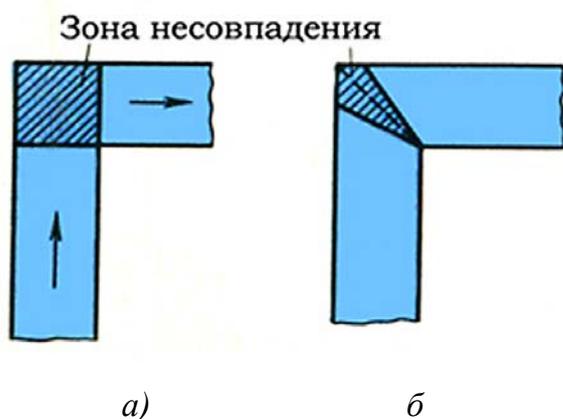


Рис. 7. «Зоны несовпадения» при прямом (а) и косом (б) стыках

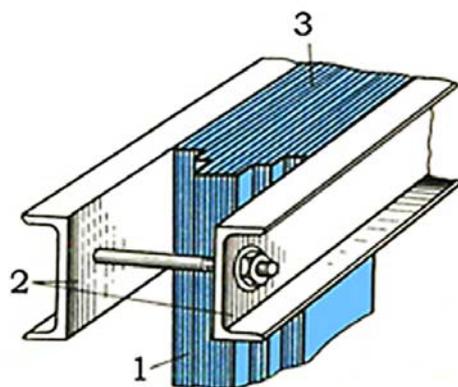


Рис. 8. Опрессовка верхнего и нижнего ярма

Во избежание возникновения разности потенциалов между металлическими частями во время работы трансформатора, что может вызвать пробой изоляционных промежутков, разделяющих эти части, магнитопровод и детали его крепления *обязательно заземляют*. Заземление осуществляют медными лентами, вставляемыми между стальными пластинами магнитопровода одними концами и прикрепляемыми к ярмовым балкам другими концами.

Магнитопроводы трансформаторов малой мощности (обычно мощностью не более 1 кВ·А) чаще всего изготавливают из узкой ленты электротехнической холоднокатаной стали путем навивки. Такие магнитопроводы делают разрезными (рис. 9), а после насадки обмоток собирают встык и стягивают специальными хомутами.

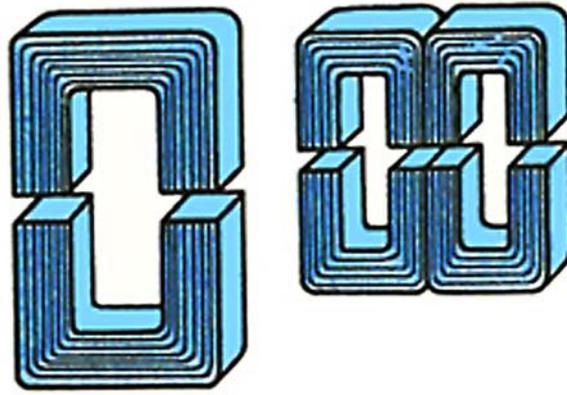


Рис. 9. Ленточные разрезные магнитопроводы

Обмотки. Обмотки трансформаторов средней и большой мощности выполняют из обмоточных проводов круглого или прямоугольного сечения, изолированных хлопчатобумажной пряжей или кабельной бумагой. Основой обмотки в большинстве случаев является бумажно-бакелитовый цилиндр, на котором крепятся элементы (рейки, угловые шайбы и т.п.), обеспечивающие обмотке механическую и электрическую прочность.

По взаимному расположению на стержне обмотки разделяют на концентрические и чередующиеся. *Концентрические обмотки* выполняют в виде цилиндров, размещаемых на стержне концентрически: ближе к стержню обычно располагают обмотку НН (требующую меньшей изоляции от стержня), а снаружи — обмотку ВН (рис. 10, а).

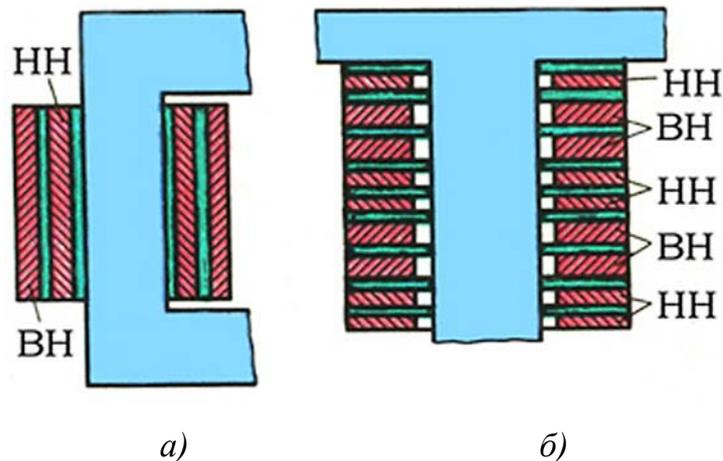


Рис. 10. Концентрическая (а) и дисковая (б) обмотки трансформаторов

Чередующиеся (дисковые) обмотки выполняют в виде отдельных секций (дисков) НН и ВН и располагают на стержне в чередующемся порядке (рис. 10, б). Чередующиеся обмотки применяют весьма редко, лишь в некоторых трансформаторах специального назначения.

Концентрические обмотки в конструктивном отношении разделяют на несколько типов. Рассмотрим некоторые из них.

1. *Цилиндрические однослойные или двухслойные обмотки* из провода прямоугольного сечения (рис. 11, а) используют главным образом в качестве обмоток НН на номинальный ток до 800 А.

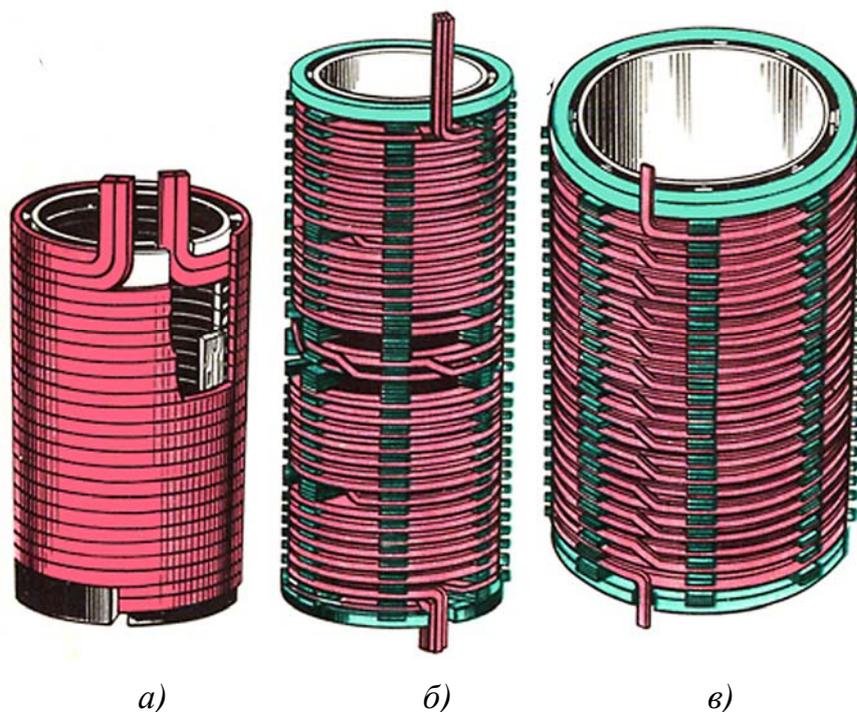


Рис. 11. Конструкция концентрических обмоток

2. *Винтовые одно- и многоходовые обмотки* выполняют из нескольких параллельных проводов прямоугольного сечения. При этом витки укладывают по винтовой линии, имеющей один или несколько ходов (рис. 11, б). Для того чтобы все параллельные проводники одинаково нагружались током, выполняют транспозицию (перекладку) этих проводников. При транспозиции стремятся, чтобы в пределах одного витка каждый проводник занимал все положения. Транспозиция может быть групповой (рис. 12, а), когда параллельные провода делятся на две группы и перестановка осуществляется группами, и общей, когда меняется взаимное расположение всех параллельных проводов (рис. 12, б).

3. *Непрерывные обмотки* (рис. 11, в) состоят из отдельных дисковых обмоток (секций), намотанных по спирали и соединенных между собой без пайки, т.е. выполненных «непрерывно». Если обмотка выполняется несколькими параллельными проводами, то в ней применяют транспозицию проводов. Непрерывные обмотки, несмотря на некоторую сложность изготовления, получили наибольшее применение в силовых трансформаторах как в качестве обмоток ВН, так и в качестве обмоток НН. Это объясняется их большой механической прочностью и надежностью.

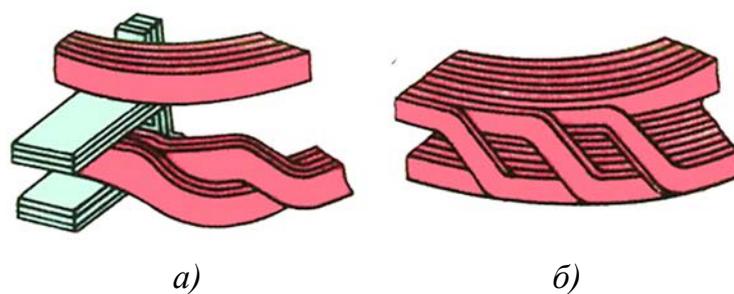


Рис. 12. Транспозиция в винтовых обмотках:
 а — групповая; б — общая

В трансформаторах с масляным охлаждением магнитопровод с обмотками помещен в бак, наполненный трансформаторным маслом (рис. 13). Трансформаторное масло, омывая обмотки 2 и 3 и магнитопровод 1, отбирает от них теплоту и, обладая более высокой теплопроводностью, чем воздух, через стенки бака 4 и трубы радиатора 5 отдает ее в окружающую среду. Наличие трансформаторного масла обеспечивает более надежную работу высоковольтных трансформаторов, так как электрическая прочность масла намного выше, чем воздуха. Масляное охлаждение интенсивнее воздушного, поэтому габариты и вес масляных трансформаторов меньше, чем у сухих трансформаторов такой же мощности.

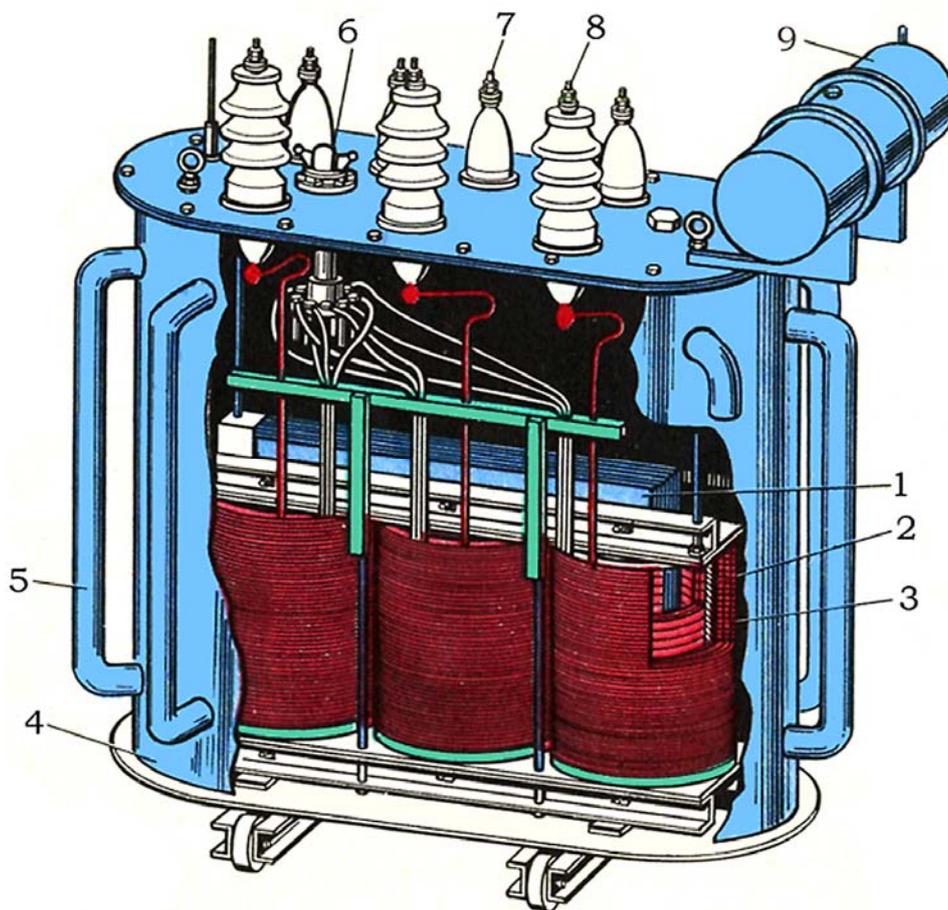


Рис. 13. Устройство трансформатора с масляным охлаждением

В трансформаторах мощностью до 20-30 кВ·А применяют баки с гладкими стенками. У более мощных трансформаторов для увеличения охлаждаемой поверхности стенки бака делают ребристыми или же применяют трубчатые баки. Масло, нагреваясь, поднимается вверх, а охлаждаясь, опускается вниз. При этом масло циркулирует в трубах, что способствует более быстрому его охлаждению.

Для компенсации объема масла при изменении температуры, а также для защиты масла от окисления и увлажнения при контакте с воздухом в трансформаторах применяют расширитель 9, представляющий собой цилиндрический сосуд, установленный на крышке бака и сообщающийся с ним. Колебания уровня масла с изменением его температуры происходят не в баке, который всегда заполнен маслом, а в расширителе, сообщающемся с атмосферой.

В процессе работы трансформаторов не исключена возможность возникновения в них явлений, сопровождающихся бурным выделением газов, что ведет к значительному увеличению давления внутри бака, поэтому во избежание повреждения баков трансформаторы мощностью 1000 кВ·А и выше снабжают выхлопной трубой, которую устанавливают на крышке бака. Нижним концом труба сообщается с баком, а ее верхний конец заканчивается фланцем, на котором укреплен стеклянный диск. При давлении, превышающем безопасное для бака, стеклянный диск лопается и газы выходят наружу.

В трубопровод, соединяющий бак масляного трансформатора с расширителем, помещено газовое реле. При возникновении в трансформаторе значительных повреждений, сопровождаемых обильным выделением газов (например, при коротком замыкании между витками обмоток), газовое реле срабатывает и замыкает контакты цепи управления выключателя, который отключает трансформатор от сети. Обмотки трансформатора с внешней цепью соединяют вводами 7 и 8. В масляных трансформаторах для вводов обычно используют проходные фарфоровые изоляторы.

Такой ввод снабжен металлическим фланцем, посредством которого он крепится к крышке или стенке бака. К дну бака прикреплена тележка, позволяющая перемещать трансформатор в пределах подстанции. На крышке бака расположена рукоятка переключателя напряжений 6.

Свойства трансформатора определяются его номинальными параметрами: 1) номинальное первичное линейное напряжение $U_{1ном}$, В или кВ; 2) номинальное вторичное линейное напряжение $U_{2ном}$ (напряжение на выводах вторичной обмотки при отключенной нагрузке и номинальном первичном напряжении), В или кВ; 3) номинальные линейные токи в первичной $I_{1ном}$ и вторичной $I_{2ном}$ обмотках, А; 4) номинальная полная мощность $S_{ном}$, кВ·А:

$$\begin{aligned} & \text{— для однофазного трансформатора} & S_{ном} &= U_{1ном} I_{1ном}; \\ & \text{— для трехфазного} & S_{ном} &= \sqrt{3} U_{ном} I_{ном}. \end{aligned}$$

Номинальные линейные токи вычисляют по номинальной мощности трансформатора: для трехфазного трансформатора

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном} \cdot 10^3}{\sqrt{3}U_{1ном}}, \quad I_{2ном} = \frac{S_{ном} \cdot 10^3}{\sqrt{3}U_{2ном}},$$

где $S_{ном}$ — номинальная мощность трехфазного трансформатора, кВ·А.

Каждый трансформатор рассчитан для включения в сеть переменного тока определенной частоты. В СССР трансформаторы общего назначения рассчитаны на частоту $f = 50$ Гц (в некоторых других странах $f = 60$ Гц), в устройствах автоматики и связи применяют трансформаторы на частоты 50, 400 или 1 000 Гц.

1.4. Параллельная работа трансформаторов

Параллельной работой двух или нескольких трансформаторов называется работа при параллельном соединении их обмоток как на первичной, так и на вторичной сторонах. При параллельном соединении одноименные зажимы трансформаторов присоединяют к одному и тому же проводу сети (рис. 1).

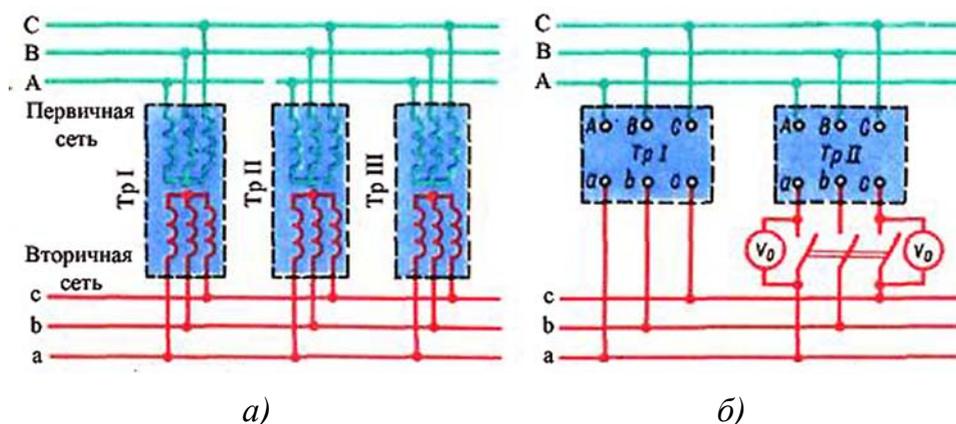


Рис. 14. Включение трансформатора на параллельную работу

Применение нескольких параллельно включенных трансформаторов вместо одного трансформатора суммарной мощности необходимо для обеспечения бесперебойного энергоснабжения в случае аварии в каком-либо трансформаторе или отключения его для ремонта. Это также целесообразно при работе трансформаторной подстанции с переменным графиком нагрузки, например когда мощность нагрузки значительно меняется в различные часы суток. В этом случае при уменьшении мощности нагрузки можно отключить один или несколько трансформаторов для того, чтобы нагрузка трансформаторов, оставшихся включенными, была близка к номинальной. В итоге эксплуатационные показатели работы трансформаторов (КПД и $\cos \varphi_2$) будут достаточно высокими.

Для того чтобы нагрузка между параллельно работающими трансформаторами распределялась пропорционально их номинальным мощностям, допускается параллельная работа двухобмоточных трансформаторов при следующих условиях.

1. При одинаковом первичном напряжении вторичные напряжения должны быть равны.

Другими словами, трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации: $k_1 = k_{11} = k_{111} = \dots$. При несоблюдении этого условия, даже в режиме х.х., между параллельно включенными трансформаторами возникает уравнивающий ток, обусловленный разностью вторичных напряжений трансформаторов (рис. 15, а).

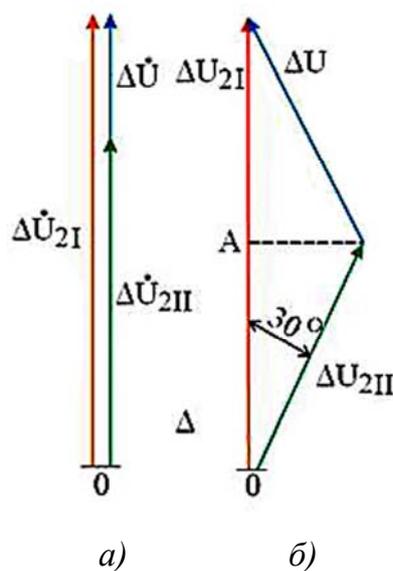


Рис. 15. Появление напряжения ΔU при несоблюдении условий включения трансформаторов на параллельную работу

При нагрузке трансформаторов уравнивающий ток накладывается на нагрузочный. При этом трансформатор с более высоким вторичным напряжением х.х. (с меньшим коэффициентом трансформации) оказывается перегруженным, а трансформатор равной мощности, но с большим коэффициентом трансформации недогруженным. Так как перегрузка трансформаторов недопустима, то приходится снижать общую нагрузку. При значительной разнице коэффициентов трансформации нормальная работа трансформаторов становится практически невозможной. Допускается включение на параллельную работу трансформаторов с различными коэффициентами трансформации, если разница коэффициентов трансформации не превышает $\pm 0,5\%$ их среднего значения: $\Delta R = [(k_1 - k_{11}) / k] 100\% \leq 0,5\%$, где $k = \sqrt{k_1 k_{11}}$ — среднее геометрическое значение коэффициентов трансформаторов.

2. Трансформаторы должны принадлежать одной группе соединения.

При несоблюдении этого условия вторичные линейные напряжения трансформаторов окажутся сдвинутыми по фазе относительно друг друга и в цепи трансформаторов появится разностное напряжение дельта ΔU , под действием которого возникнет значительный уравнивающий ток. Так, если включить на параллельную работу два трансформатора с одинаковыми коэффициентами трансформации, но один из них принадлежит к нулевой ($Y/Y - 0$), а другой — к одиннадцатой ($Y/\Delta - 11$) группам соединения, то линейное напряжение U_{21} первого трансформатора будет больше линейного напряжения U_{211} второго трансформатора в $\sqrt{3}$ раз $U_{21}/U_{211} = \sqrt{3}$. Кроме того, векторы этих напряжений окажутся сдвинутыми по фазе относительно друг друга на угол 30° (рис. 15, б). В этих условиях во вторичной цепи трансформаторов появится разностное напряжение ΔU . Для определения величины ΔU воспользуемся построениями рис. 15, б: отрезок OA равен $\sqrt{3}U_{211}/2$ или учитывая $U_{211} = U_{21}\sqrt{3}$, получим $OA = 0,5U_{21}$. Следовательно, треугольник, образованный векторами напряжений $\Delta \dot{U}_{21}$, $\Delta \dot{U}_{211}$ и $\Delta \dot{U}$, — равнобедренный, а поэтому разностное напряжение $\Delta U = U_{211}$. Появление такого разностного напряжения привело бы к возникновению во вторичной цепи трансформаторов уравнивающего тока, в 15-20 раз превышающего номинальный ток нагрузки, т.е. возникла бы аварийная ситуация. Величина ΔU становится еще большей, если трансформаторы принадлежат нулевой и шестой группам соединения ($\Delta U = 2U_2$), так как в этом случае векторы линейных вторичных напряжений окажутся в противофазе.

3. Трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения к.з.:

$$u_1 = u_{11} = u_{111} = \dots$$

Соблюдение этого условия необходимо для того, чтобы общая нагрузка распределялась между трансформаторами пропорционально их номинальным мощностям. С некоторым приближением, пренебрегая токами х.х., можно параллельно включенные трансформаторы заменить их сопротивлениями к.з., Z_{k1} и Z_{k11} и тогда от схемы, показанной на (рис. 16, а), можно перейти к эквивалентной схеме (рис. 16, б).

Известно, что токи в параллельных ветвях распределяются обратно пропорционально их сопротивлениям: $I_1 / I_{11} = Z_{k11} / Z_{k1}$.

Умножим обе части равенства на $I_{11ном} U_{ном} / (I_{1ном} U_{ном})$ левую часть на $U_{ном} / U_{ном}$, а правую часть на $100/100$, получим

$$\frac{I_1 I_{11ном} U_{ном} U_{ном}}{I_{11} I_{1ном} U_{ном} U_{ном}} = \frac{Z_{k11} I_{11ном} U_{ном} 100}{Z_{k1} I_{1ном} U_{ном} 100}.$$

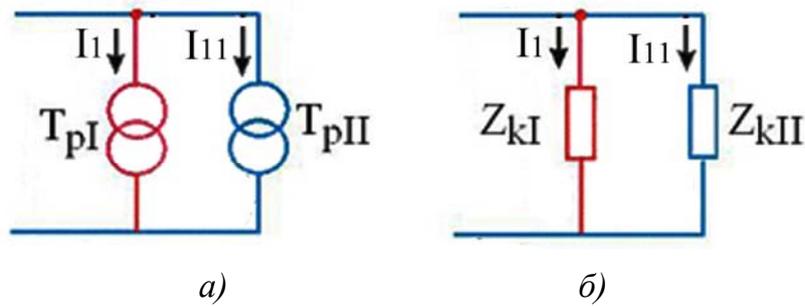


Рис. 16. К понятию о распределении нагрузки при параллельной работе трансформаторов

Затем преобразуем полученное равенство, имея в виду следующее:
 $I_1 U_{ном} = S_1$ и $I_{11} U_{ном} = S_{11}$ — фактическая нагрузка первого и второго трансформаторов соответственно, В·А;

$I_{1ном} U_{ном} = S_{11}$ и $I_{11} U_{ном} = S_{11}$ — номинальные мощности этих трансформаторов, В·А;

$(I_{1ном} Z_{kI}/U_{ном})100 = u_{1k}$ и $(I_{11ном} Z_{kII}/U_{ном}) 100 = u_{11k}$ напряжения к.з. трансформаторов, %.

В результате получим

$$\frac{S_1}{S_{11ном}} = \frac{u_{k11}}{u_{k1}} \quad \text{или} \quad \frac{S'_1}{S'_{11}} = \frac{u_{k11}}{u_{k1}}.$$

Из этого соотношения следует, что относительные мощности (нагрузки) параллельно работающим трансформаторов обратно пропорциональны их напряжениям к.з. Другими словами, при неравенстве напряжений к.з, параллельно работающим трансформаторов больше нагружается трансформатор с меньшим напряжением к.з. В итоге это ведет к перегрузке одного трансформатора (с меньшим u_k) и недогрузке другого (с большим u_k). Чтобы не допустить перегрузки трансформатора, необходимо снизить общую нагрузку. Таким образом, неравенство напряжений к.з. не допускает полного использования параллельно работающих трансформаторов по мощности.

Учитывая, что практически не всегда можно подобрать трансформаторы с одинаковыми напряжениями к.з., допускается включение трансформаторов на параллельную работу при разнице напряжений к.з. не более чем 10% от их среднего арифметического значения. Разница в напряжениях к.з. трансформаторов тем больше, чем больше эти трансформаторы отличаются друг от друга по мощности. Поэтому рекомендуется отношение номинальных мощностей трансформаторов 3:1.

Помимо соблюдения указанных трех условий, необходимо перед включением трансформаторов на параллельную работу проверить порядок чередования фаз, который должен быть одинаковым у всех трансформаторов.

Соблюдение всех перечисленных условий проверяется *фазировкой трансформаторов*, сущность которой состоит в том, что одну пару противоположно расположенных зажимов на рубильнике (см. рис. 14, б) соединяют проводом и вольтметром V_o (нулевой вольтметр) измеряют напряжение между оставшимися несоединенными парами зажимов рубильника. Если вторичные напряжения трансформаторов равны, их группы соединения одинаковы и порядок следования фаз у них один и тот же, то показания вольтметра V_o равны нулю. В этом случае трансформаторы можно подключать на параллельную работу. Если вольтметр V_o покажет некоторое напряжение, то необходимо выяснить, какое из условий параллельной работы нарушено. Необходимо устранить это нарушение и вновь провести фазировку трансформаторов. Следует отметить, что при нарушении порядка следования фаз вольтметр V_o покажет двойное линейное напряжение. Это необходимо учитывать при подборе вольтметра, предел измерения которого должен быть не менее двойного линейного напряжения на вторичной стороне трансформаторов.

Общая нагрузка всех включенных на параллельную работу трансформаторов S не должна превышать суммарной номинальной мощности этих трансформаторов: $S \leq \sum S_{ном}$.

Распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами определяется следующим образом:

$$S_x = \frac{SS_{номx}}{\left[u_{kx} \sum \left(\frac{S_{номx}}{u_{kx}} \right) \right]}$$

1.5. Автотрансформаторы

Автотрансформатор — это такой вид трансформатора, в котором, помимо магнитной связи между обмотками, имеется еще и электрическая связь. Обмотки обычного трансформатора можно включить по схеме автотрансформатора, для чего выход x обмотки ω_{ax} соединяют с выводом А обмотки ω_{ax} (рис. 17). Если выводы Ах подключить к сети, а к выводам Ах подключить нагрузку Z_n , то получим понижающий автотрансформатор. Если же выводы ax подключить к сети, а к выводам A_x подключить нагрузку Z_n , то получим повышающий автотрансформатор.

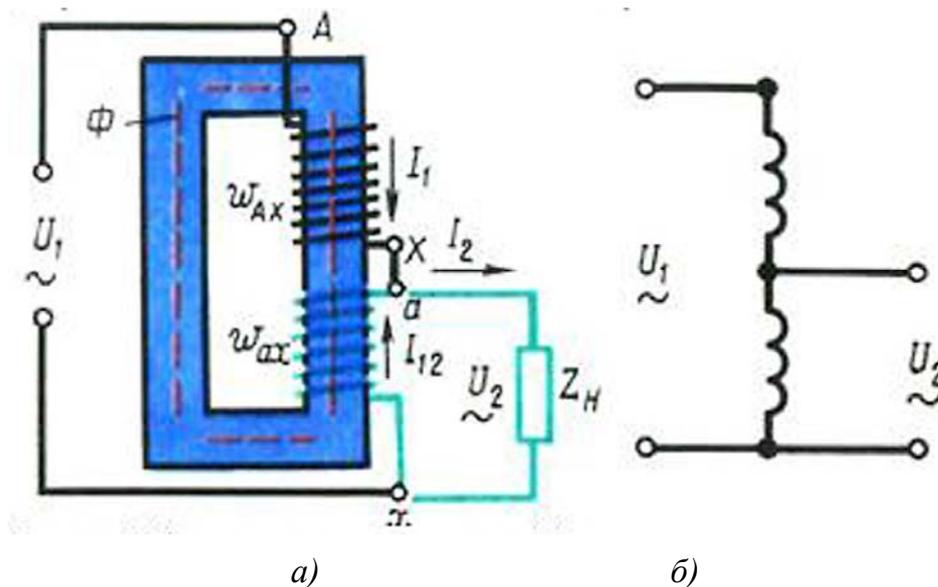


Рис. 17. Электромагнитная (а) и принципиальная (б) схемы однофазного понижающего автотрансформатора

Рассмотрим подробнее работу понижающего автотрансформатора. Обмотка ω_{ax} одновременно является частью первичной обмотки и вторичной обмоткой. В этой обмотке проходит ток I_{12} . Для точки a запишем уравнение токов:

$$I_{12} = I_1 + I_2 \quad \text{или} \quad I_{12} = I_2 - I_1,$$

т.е. по виткам ω_{ax} проходит ток I_{12} , равный разности вторичного I_2 и первичного I_1 токов. Если коэффициент трансформации автотрансформатора немногим больше единицы, то токи I_1 и I_2 мало отличаются друг от друга, а их разность составляет небольшую величину. Это позволяет выполнить витки ω_{ax} проводом уменьшенного сечения. Введем понятие проходной мощности автотрансформатора, представляющей собой всю передаваемую мощность $S_{np} = U_2 I_2$ из первичной цепи во вторичную. Кроме того, различают еще расчетную мощность $S_{рас}$, представляющую собой мощность, передаваемую из первичной во вторичную цепь магнитным полем. Расчетной эту мощность называют потому, что размеры и вес трансформатора зависят от величины этой мощности. В трансформаторе вся проходная мощность является расчетной, так как между обмотками трансформатора существует лишь магнитная связь. В автотрансформаторе между первичной и вторичной цепями, помимо *магнитной связи*, существует еще и *электрическая*. Поэтому расчетная мощность составляет лишь часть проходной мощности, другая ее часть передается между цепями без участия магнитного поля. В подтверждение этого разложим проходную мощность автотрансформатора $S_{np} = I_2 U_2$ на составляющие. Воспользуемся для этого выражением. Подставив это выражение в формулу проходной мощности, получим

$$S_{np} = U_2 I_2 = U_2 (I_1 + I_{12}) = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = S_3 + S_{расч}.$$

Здесь $S_3 = U_2 I_1$ — мощность, передаваемая из первичной цепи автотрансформатора во вторичную благодаря электрической связи между этими цепями.

Таким образом, расчетная мощность в автотрансформаторе $S_{pac} = U_2 I_{12}$ составляет лишь часть проходной. Это дает возможность для изготовления автотрансформатора использовать магнитопровод меньшего сечения, чем в трансформаторе равной мощности.

Средняя длина витка обмотки также становится меньше, следовательно, уменьшается расход меди на выполнение обмотки автотрансформатора. Одновременно уменьшаются магнитные и электрические потери, а КПД автотрансформатора повышается.

Таким образом автотрансформатор по сравнению с трансформатором равной мощности обладает следующими преимуществами: меньшим расходом активных материалов (медь и электротехническая сталь), более высоким КПД, меньшими размерами и стоимостью. У автотрансформаторов большой мощности КПД достигает 99,7%.

Указанные преимущества автотрансформатора тем значительнее, чем больше мощность S_3 , а следовательно, чем меньше расчетная часть проходной мощности.

Мощность передаваемая из первичной во вторичную цепь благодаря электрической связи между этими цепями, определяется выражением

$$S_3 = U_2 I_1 = U_2 I_2 / k_A = S_{np} / k_A,$$

т.е. значение мощности S_3 обратно пропорционально коэффициенту трансформации автотрансформатора k_A .

Из графика (рис. 18) видно, что применение автотрансформатора дает заметные преимущества по сравнению с двухобмоточным трансформатором лишь при небольших значениях коэффициента трансформации. Например, при $k_A = 1$ вся мощность автотрансформатора передается во вторичную цепь за счет электрической связи между цепями ($S_3/S_{np} = 1$).

Наиболее целесообразно применение автотрансформаторов с коэффициентом трансформации $k_A \leq 2$. При большом значении коэффициента трансформации преобладающее значение имеют недостатки автотрансформатора, состоящие в следующем:

1. Большие токи к.з. в случаях понижающего автотрансформатора; при замыкании точек a и x (см. рис. 17, a) напряжение U_1 подводится лишь к небольшой части витков Aa , которые обладают очень малым сопротивлением к.з. В этом случае автотрансформаторы не могут защитить сами себя от разрушающего действия токов к.з., поэтому токи к.з. должны ограничиваться сопротивлением других элементов электрической установки, включаемых в цепь автотрансформатора.

2. Электрическая связь стороны ВН со стороной НН; это требует усиленной электрической изоляции всей обмотки.

3. При использовании автотрансформаторов в схемах понижения напряжения между проводами сети НН и землей возникает напряжение, приблизительно равное напряжению между проводом и землей на стороне ВН.

4. В целях обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала нельзя применять автотрансформаторы для понижения напряжения сетей ВН до значений НН, подводимого непосредственно к потребителям.

Силовые автотрансформаторы широко применяют в линиях передачи и распределения электроэнергии для связи сетей смежных напряжений, например 110 и 220, 220 и 500 кВ и др. Такие автотрансформаторы обычно выполняют на большие мощности (до 500 МВ·А и выше). Обмотки трехфазных автотрансформаторов обычно соединяют в звезду (рис. 19). Автотрансформаторы применяют в электроприводе переменного тока для уменьшения пусковых токов двигателей значительной мощности, а также для регулировки режимов работы электрометаллургических печей. Автотрансформаторы малой мощности применяют в устройствах радио, связи и автоматики.

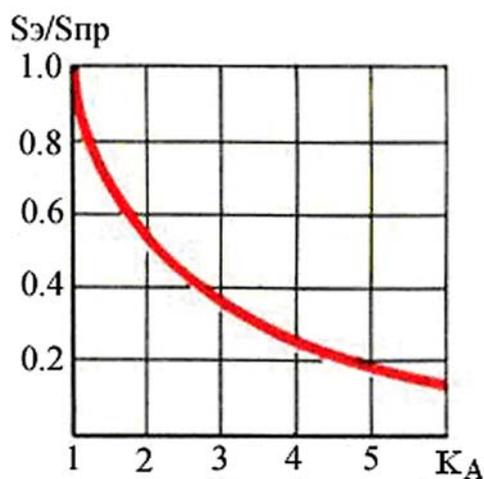


Рис. 18. Зависимость $S_z/S_{пр}$ от коэффициента трансформации автотрансформатора

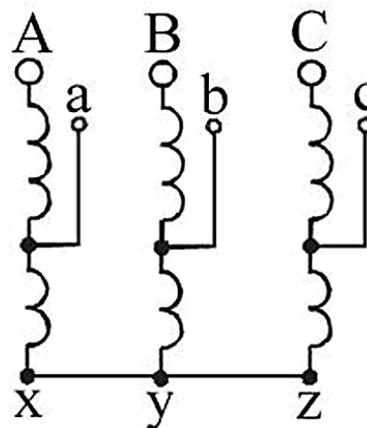


Рис. 19. Трехфазный автотрансформатор

Широко распространены автотрансформаторы с переменным коэффициентом трансформации. В этом случае автотрансформатор снабжают устройством, позволяющим регулировать значение вторичного напряжения путем изменения числа витков w_{ax} . Осуществляется это либо переключателем, либо с помощью скользящего контакта (щетке), перемещаемого непосредственно по зачищенным от изоляции виткам обмотки. Такие автотрансформаторы, называемые регуляторами напряжения, могут быть однофазными (рис. 20) и трехфазными.

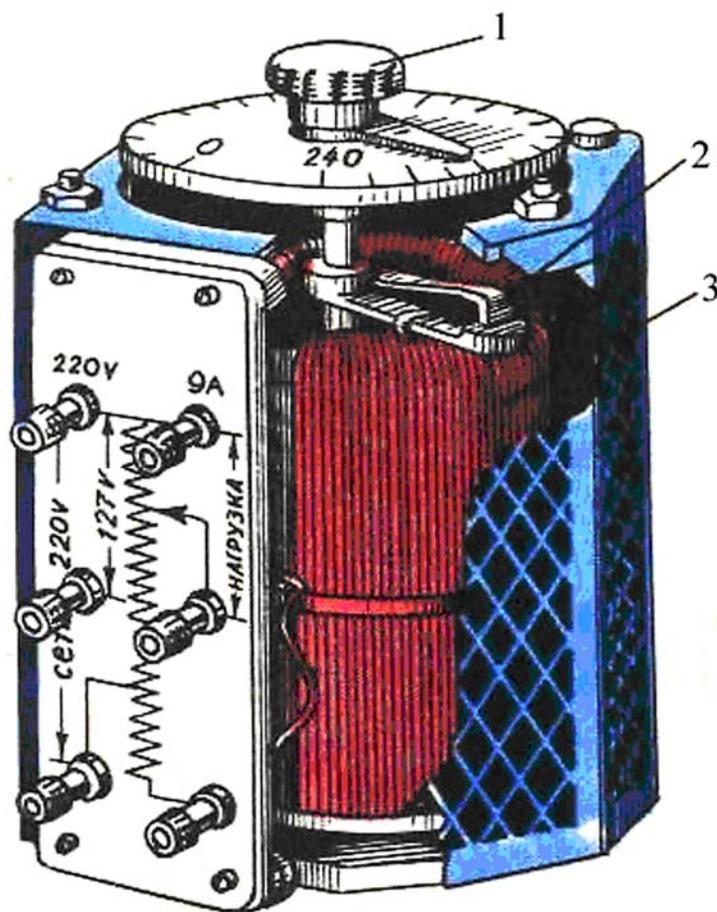


Рис. 20. Регулировочный однофазный автотрансформатор:

*1 — ручка для перемещения контактной щетки;
2 — щеткодержатель; 3 — обмотка*

1.6. Трансформаторы для дуговой электросварки

Трансформатор для дуговой электросварки, обычно называемый сварочным трансформатором, представляет собой однофазный двухобмоточный понижающий трансформатор, преобразующий напряжение сети 220 или 380 В в напряжение 60-70 В, необходимое для надежного зажигания и устойчивого горения электрической дуги между металлическим электродом и свариваемыми деталями.

Специфика работы сварочного трансформатора состоит в прерывистом режиме его работы: зажиганию электрической дуги предшествует короткое замыкание вторичной цепи трансформатора, а обрыв дуги создает режим холостого хода. Номинальный режим работы трансформатора соответствует устойчивому горению электрической дуги. Для ограничения тока в сварочном трансформаторе приняты меры, суть которых сводится к увеличению индуктивного сопротивления. С этой целью первичную обмотку трансформатора располагают на одном стержне, а вторичную — на другом. Это ведет к росту магнитного рассеяния, а следовательно, к увеличению индуктивного сопротивления обмоток. Другой мерой является включение

во вторичную цепь трансформатора последовательно индуктивной катушки — дросселя Dp (рис. 21, а), представляющего собой катушку из медного провода прямоугольного сечения, расположенную на стальном магнитопроводе. Дроссель снабжен устройством типа «винт — гайка», позволяющим вращением винта перемещать ярмо так, что воздушный зазор δ между ярмом и стержнями меняется от $\delta \approx 0$ до $\delta = \delta_{\max}$.

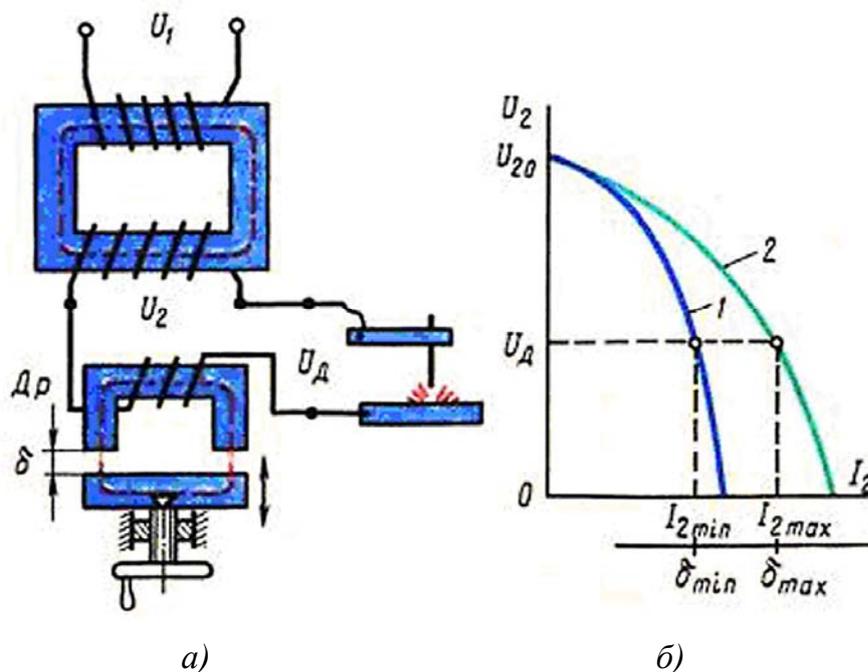


Рис. 21. Схема включения (а) и внешние характеристики (б) трансформатора для электродуговой сварки

При этом минимальному значению δ соответствует наибольшее индуктивное сопротивление дросселя, а следовательно, минимальное значение рабочего тока $I_2 = I_{2\min}$, а максимальному значению $\delta = \delta_{\max}$ — наименьшее индуктивное сопротивление дросселя и максимальное значение рабочего тока $I_2 = I_{2\max}$. Повышенное индуктивное сопротивление обмоток и наличие дросселя Dp обеспечивают сварочному трансформатору круто падающие внешние характеристики $U_2 = f(I_2)$, необходимые для устойчивого горения электрической дуги (рис. 21, б). Изменяя величину воздушного зазора δ в дросселе Dp можно плавно менять угол наклона внешних характеристик, при $\delta \approx 0$ наклон характеристики наибольший (график 1), а при $\delta \approx \delta_{\max}$ наклон характеристики минимальный (график 2). Рабочий ток сварочного трансформатора I_2 соответствует напряжению электрической дуги $U_d = 30$ В.

В некоторых конструкциях сварочных трансформаторов дроссель совмещают с трансформатором. Значительное индуктивное сопротивление сварочного трансформатора ведет к снижению его коэффициента мощности $\cos \varphi$, который обычно не превышает 0,4-0,5.

1.7. Измерительные трансформаторы тока и напряжения

Для расширения пределов измерения приборов широко используются шунтирующие и добавочные резисторы. Но этот метод нельзя назвать универсальным, т.к. возможности шунтирующих и добавочных резисторов ограничены. Так, шунтирующие резисторы предназначены для преобразования токов до 5000 А, а добавочные резисторы — для преобразования напряжений до 30 кВ. Кроме того, применение вышеуказанных резисторов приводит к увеличению габаритов приборов, нестабильности их показаний, возрастанию опасности обслуживания. Поэтому при измерении значительных токов и напряжений переменного тока возможности приборов могут быть расширены при помощи измерительных трансформаторов тока и напряжения. Применение измерительных трансформаторов дает возможность измерять силу тока и напряжения в высоковольтных цепях амперметрами с диапазонами измерений 0...5 А и вольтметрами с диапазонами измерений 0...100 В. Кроме того, использование измерительных трансформаторов в высоковольтных цепях повышает безопасность обслуживания измерительных приборов, т.к. позволяет разделить силовые и измерительные цепи электрооборудования.

Измерительные трансформаторы напряжения

Устройство трансформатора напряжения показано на рисунке 22.

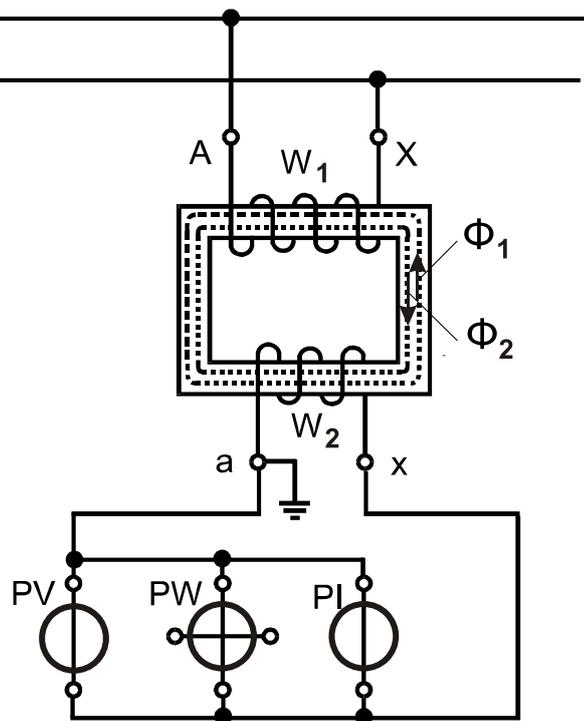


Рис. 22. Измерительный трансформатор напряжения

По своему устройству и принципу действия он аналогичен силовому трансформатору. Обмотка высшего напряжения с большим числом витков включается в измерительную цепь, а ко вторичной обмотке с меньшим числом витков подключают измерительные приборы (вольтметры, обмотки напряжения ваттметров, счетчиков и др.).

Характерной особенностью измерительного трансформатора напряжения является большое сопротивление приборов, включаемых во вторичную цепь, вследствие чего трансформатор работает в условиях, близких к *холостому ходу*.

Отношение номинальных значений первичного и вторичного напряжений $U_{1Н}$ и $U_{2Н}$, или отношение числа витков обмотки высокого напряжения W_1 к числу витков обмотки низкого напряжения W_2 , называют *номинальным коэффициентом трансформации трансформатора напряжения*:

$$K_U = \frac{U_{1Н}}{U_{2Н}} \approx \frac{W_1}{W_2}.$$

Этот параметр указывают в паспортных данных трансформатора.

Вторичные цепи измерительных трансформаторов напряжения рассчитаны на напряжение 100 и 150 В, а лабораторных — на $100\sqrt{3}$ В.

При эксплуатации трансформаторов напряжения для обеспечения безопасности обслуживания обмотку низшего напряжения заземляют.

В зависимости от значения погрешностей, трансформаторы напряжения подразделяются на следующие классы точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0 и 3,0.

Измерительные трансформаторы напряжения используются в цепях контроля напряжения сельских электрических сетей и устанавливаются преимущественно на трансформаторных подстанциях.

Измерительные трансформаторы тока

Предназначены для преобразования измеряемых токов в стандартные (обычно 5 А). Первичная цепь трансформатора тока (рис. 23) содержит малое число витков медного или алюминиевого провода, контакты которого Л1 и Л2 (*линия*) включают в разрыв проводника с измеряемым током. К контактам И1 и И2 (*измерительный прибор*) вторичной обмотки трансформатора, число витков которой больше, чем первичной, подключают приборы, диапазон которых требует расширения по току (амперметры, токовые обмотки ваттметров, счетчиков и т.д.). Поскольку сопротивление катушек таких приборов мало, трансформаторы тока работают в условиях, близких к *короткому замыканию*.

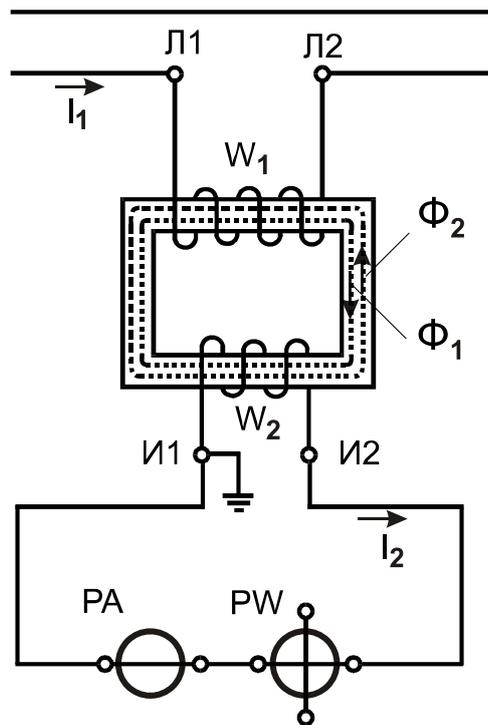


Рис. 23. Измерительный трансформатор тока

Номинальный коэффициент трансформации трансформатора тока:

$$K_I = \frac{I_1}{I_2} \approx \frac{W_1}{W_2},$$

где I_1 — ток в первичной обмотке, А;

I_2 — ток во вторичной обмотке, А.

Трансформатор тока работает следующим образом. При прохождении тока I_1 по первичной обмотке в ней создается намагничивающая сила $I_1 W_1$, которая вызывает в сердечнике появление переменного магнитного потока Φ_1 . Этот поток, пронизывая ветви вторичной обмотки, наводит в ней ЭДС E_2 и, следовательно, ток I_2 . Ток I_2 , в свою очередь, создает намагничивающую силу $I_2 W_2$ и свой магнитный поток Φ_2 . Так как, согласно закону Ленца, этот поток направлен навстречу потоку Φ_1 , результирующий магнитный поток в сердечнике трансформатора небольшой. Поэтому во вторичной обмотке наводится небольшая ЭДС, которая вызывает появление сравнительно небольшого вторичного тока I_2 практически при замкнутой накоротко вторичной обмотке.

При работе с трансформаторами тока необходимо следить за тем, чтобы вторичная обмотка при подключении первичной не оставалась разомкнутой по следующим причинам.

При размыкании вторичной цепи, что может быть, например, при отключении амперметра, исчезает встречный магнитный поток Φ_2 , следовательно, по сердечнику начинает проходить большой переменный поток Φ_1 , который вызывает наведение большой ЭДС во вторичной об-

мотке трансформатора (до 1 000 В), т.к. вторичная обмотка имеет большее число витков. Наличие такой большой ЭДС нежелательно, т.к. это опасно для обслуживающего персонала и может привести к пробое изоляции вторичной обмотки, а при длительном нагреве — к пробое изоляции обеих обмоток. Поэтому надо помнить, что, если надо отключить измерительные приборы, подключенные к клеммам И1 и И2 трансформатора тока, необходимо сначала закоротить либо вторичную, либо первичную обмотку трансформатора (как, например, на лабораторном трансформаторе тока, используемом в данной работе).

Выпускаемые промышленностью трансформаторы тока подразделяются на следующие классы точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 3,0; 4,0.

При отсутствии разметки выводов трансформатора тока можно произвести ее, используя комбинированный прибор в режиме вольтметра или вольтметр магнитоэлектрической системы. Для этого собирается схема согласно рисунку 24.

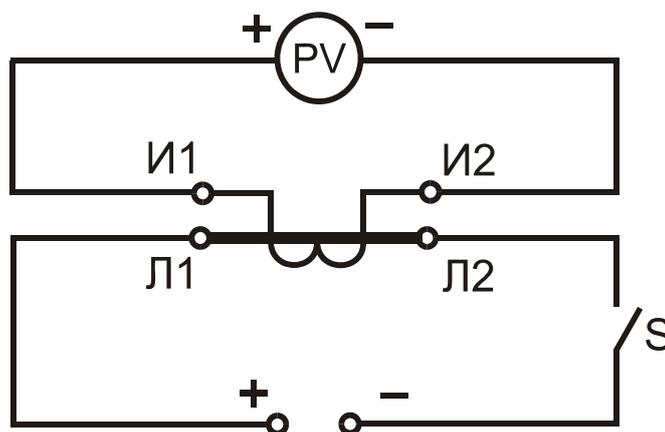


Рис. 24. Схема для определения маркировки выводов трансформатора тока

Начало и конец вторичной обмотки должны быть выведены таким образом, чтобы при направлении тока в первичной цепи от Л1 к Л2 ток во вторичной обмотке проходил от И1 к И2.

Если при замыкании выключателя S стрелка вольтметра отклоняется вправо, то это означает, что выводу трансформатора, соединенному с положительным зажимом вольтметра, надо присвоить обозначение И1.

Измерительные трансформаторы тока широко используются в цепях контроля параметров сельских электрических сетей и установок.

На рисунке 25 приведена схема для исследования измерительных трансформаторов тока и напряжения для проверки их фактических коэффициентов трансформации.

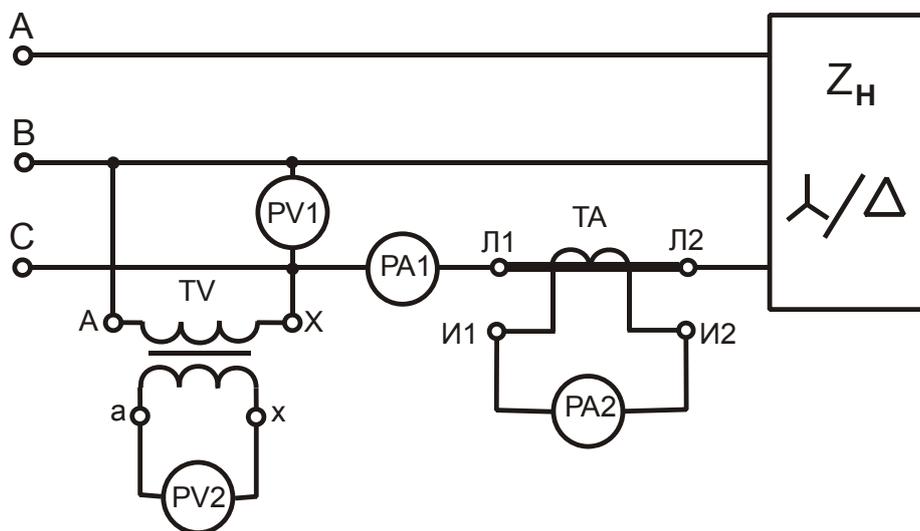


Рис. 25. Схема для исследования измерительных трансформаторов

В качестве образцовых приборов используются амперметры и вольтметры классов точности не ниже 0,5. Нагрузка может быть любая: активная, активно-индуктивная или емкостная.

Контрольные вопросы к разделу 1

1. Каков принцип работы двухобмоточного трансформатора?
2. Почему трансформаторы не работают от сети постоянного тока?
3. Из каких частей состоит активная часть трансформатора? Каковы их назначение и конструкция?
4. Каково назначение трансформаторного масла?
5. Как определить номинальные токи и номинальное вторичное напряжение трансформатора?
6. Почему с увеличением тока нагрузки увеличивается ток в его первичной обмотке?
7. Как изменится отношение линейных напряжений трехфазного трансформатора, если его обмотки переключить со схемы Δ/Y на Y/Δ ?
8. Будет ли изменяться ток х.х. и как при увеличении или уменьшении сечения стержней магнитопровода?
9. На что расходуется активная мощность, потребляемая трансформатором при опытах х.х. и к.з.
10. Как опытным путем определить напряжение к.з. трансформатора?
11. К какой обмотке целесообразно подводить напряжение при опыте х.х., а к какой — при опыте к.з.? Объясните почему?
12. Объясните принцип регулирования напряжения под нагрузкой.
13. Что такое группа соединения обмоток и как она обозначается?
14. Какие бывают группы соединения обмоток?

15. Как из основной группы соединения можно получить производную?
16. Какие условия необходимо соблюдать при включении трансформаторов на параллельную работу?
17. Что такое фазировка трансформатора и как она выполняется?
18. Каковы достоинства трехобмоточных трансформаторов?
19. Перечислите достоинства и недостатки автотрансформаторов.
20. Зависят ли достоинства автотрансформаторов от коэффициента трансформации? Объясните почему.
21. Объясните устройство автотрансформатора с переменным коэффициентом трансформации.
22. Для чего предназначены измерительные трансформаторы тока и напряжения?
23. Каковы устройство и принцип действия трансформатора напряжения?
24. Каковы устройство и принцип действия трансформатора тока?
25. Каковы требования техники безопасности при измерениях с использованием трансформаторов тока?
26. Как учитываются действительные показания приборов, включенных через ТН и ТТ?
27. Какие приборы можно подключать к вторичным обмоткам ТН и ТТ?
28. Как производится разметка зажимов измерительного трансформатора тока?
29. Какие трансформаторы используют для питания электроэнергией жилых помещений?
30. По какой формуле определяется ЭДС трансформатора?
31. Как определяется коэффициент мощности при холостом ходе трансформатора?
32. Чему равен коэффициент трансформации, если число витков первичной обмотки $w_1 = 1\ 000$, а число витков вторичной обмотки $w_2 = 200$?
33. Какие устройства нельзя подключать к трансформатору напряжения?
34. Что представляет собой обозначение Y/Δ ?
35. Что называется группой соединения трансформатора?
36. Какой закон лежит в принципе действия трансформатора?
37. Как определяется коэффициент мощности при коротком замыкании трансформатора?
38. В каких режимах работают измерительные трансформаторы тока (ТТ) и трансформаторы напряжения (ТН)?
39. Что представляет собой схема замещения трансформатора для режима холостого хода?

40. Как выглядит внешняя характеристика трансформатора для активно-индуктивной нагрузки?
41. К чему приводит обрыв вторичной цепи трансформатора тока?
42. Какие обмотки располагают на стержне трансформатора в чередующемся порядке?
43. Какой трансформатор называется броневым?
44. Чему равно напряжение на вторичной обмотке трансформатора при холостом ходе?
45. Для чего в мощных трансформаторах применяется трансформаторное масло?
46. Для чего служит магнитопровод трансформатора?
47. Изменяется ли частота переменного тока при трансформации напряжения?
48. Напряжение U_1 , подаваемое на вход лабораторного автотрансформатора, равно 220 В. Каково будет выходное напряжение U_2 ?
49. На каком напряжении целесообразно: а) передавать электроэнергию; б) потреблять электроэнергию?

2. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

2.1. Назначение и области применения асинхронных двигателей

Асинхронные машины получили наиболее широкое применение в современных электрических установках и являются самым распространенным видом бесколлекторных машин переменного тока. Как и любая электрическая машина, асинхронная машина обратима и может работать как в генераторном, так и в двигательном режимах. Однако преобладающее применение имеют асинхронные двигатели, составляющие основу современного электропривода. Области применения асинхронных двигателей весьма широкие — от привода устройств автоматики и бытовых электроприборов до привода крупного горного оборудования (экскаваторов, дробилок, мельниц и т.п.). В соответствии с этим мощность асинхронных двигателей, выпускаемых электромашиностроительной промышленностью, составляет диапазон от долей ватт до тысяч киловатт при напряжении питающей сети от десятков вольт до 10 кВ. Наибольшее применение имеют трехфазные асинхронные двигатели, рассчитанные на работу от сети промышленной частоты (50 Гц). Асинхронные двигатели специального применения изготавливаются на повышенные частоты переменного тока (200, 400 Гц и более). Основное внимание в данном разделе уделено изучению трехфазных асинхронных двигателей общего применения. Но в конце раздела рассмотрены однофазные и конденсаторные асинхронные двигатели, а также двигатели специального назначения — линейные, исполнительные и др.

2.2. Устройство асинхронных двигателей

Асинхронный двигатель состоит из двух основных частей, разделенных воздушным зазором: неподвижного статора и вращающегося ротора. Каждая из этих частей имеет сердечник и обмотку. При этом обмотка статора включается в сеть и является как бы первичной, а обмотка ротора — вторичной, так как энергия в нее поступает из обмотки статора за счет магнитной связи между этими обмотками.

По своей конструкции асинхронные двигатели разделяются на два вида: двигатели с короткозамкнутым ротором и двигатели с фазным ротором. Рассмотрим устройство трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (рис. 26). Двигатели этого вида имеют наиболее широкое применение.

Неподвижная часть двигателя — статор — состоит из корпуса *11* и сердечника *10* с трехфазной обмоткой. Корпус двигателя отливают из алюминиевого сплава или из чугуна либо делают сварным. Рассматриваемый двигатель имеет закрытое обдуваемое исполнение. Поэтому поверхность его корпуса имеет ряд продольных ребер, назначение которых состоит в том, чтобы увеличить поверхность охлаждения двигателя.

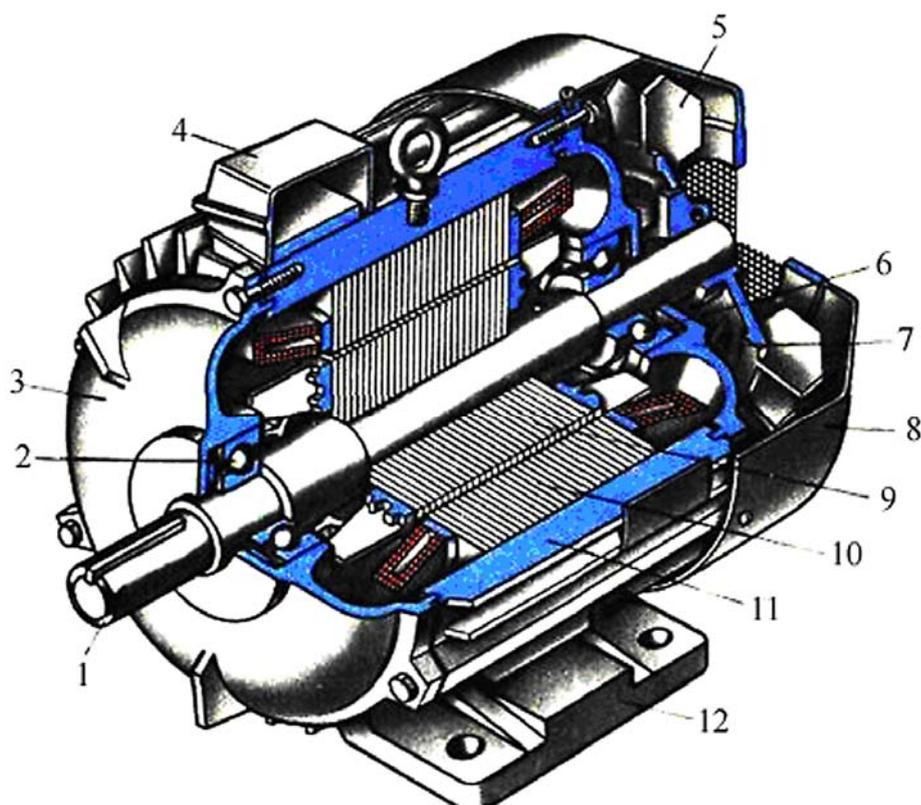


Рис. 26. Устройство трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

- 1 — вал; 2, 6 — подшипники; 3, 7 — подшипниковые щиты;
 4 — коробка выводов; 5 — вентилятор; 8 — кожух вентилятора;
 9 — сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой;
 10 — сердечник статора с обмоткой; 11 — корпус; 12 — лапы*

В корпусе расположен сердечник *10* 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 уменьшению вихревых токов, возникающих в процессе перемагничивания сердечника вращающимся магнитным полем. На внутренней поверхности сердечника статора имеются продольные пазы, в которых расположены пазовые части обмотки статора, соединенные в определенном порядке лобовыми частями, находящимися за пределами сердечника по его торцовым сторонам. В расточке статора расположена вращающаяся часть двигателя — ротор, состоящий из вала *1* и сердечника *9* с короткозамкнутой обмоткой. Такая обмотка, называемая «беличье колесо», представляет собой ряд металлических (алюминиевых или медных) стержней, расположенных в пазах сердечника ротора, замкнутых с двух сторон короткозамыкающими кольцами (рис 27, *a*). Сердечник ротора также имеет шихтованную

конструкцию, но листы ротора не покрыты изоляционным лаком, а имеют на своей поверхности тонкую пленку окисла. Это является достаточной изоляцией, ограничивающей вихревые токи, так как величина их невелика из-за малой частоты перемагничивания сердечника ротора. Например, при частоте сети 50 Гц и номинальном скольжении 6% частота перемагничивания сердечника ротора составляет 3 Гц.

Короткозамкнутая обмотка ротора в большинстве двигателей выполняется заливкой собранного сердечника ротора расплавленным алюминиевым сплавом. При этом одновременно со стержнями обмотки отливаются короткозамыкающие кольца и вентиляционные лопатки (рис. 27, б).

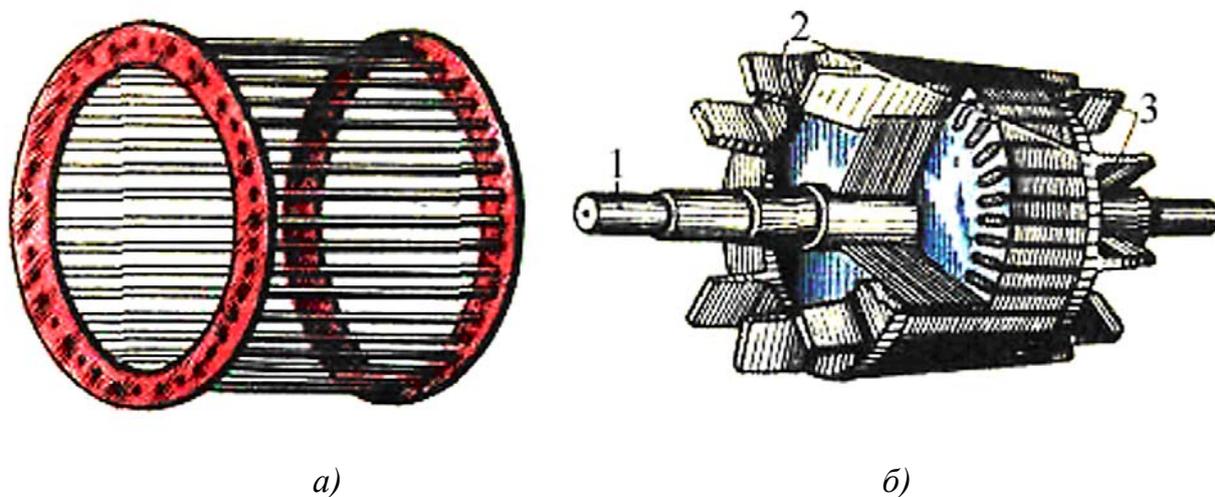


Рис. 27. Короткозамкнутый ротор:
 а — обмотка «беличья клетка»; б — ротор, с обмоткой, выполненной методом литья под давлением: 1 — вал; 2 — короткозамкнутые кольца; 3 — вентиляционные лопатки

Охлаждение двигателя осуществляется методом обдува наружной поверхности корпуса. Поток воздуха создается центробежным вентилятором 5, прикрытым кожухом 8. На торцевой поверхности этого кожуха имеются отверстия для забора воздуха. Двигатели мощностью 15 кВт и более помимо закрытого делают еще и защищенного исполнения с внутренней самовентиляцией. В подшипниковых щитах этих двигателей имеются отверстия (жалюзи), через которые воздух посредством вентилятора прогоняется через внутреннюю полость двигателя. При этом воздух «омывает» нагретые части (обмотки, сердечники) двигателя и охлаждение получается более эффективным, чем при наружном обдуве.

Концы обмоток фаз выводят на зажимы коробки выводов 4. Обычно асинхронные двигатели предназначены для включения в трехфазную сеть на два разных напряжения, отличающиеся в $\sqrt{3}$ раз. Например, двигатель рассчитан для включения в сеть на напряжения 380/660 В. Если в сети линейное напряжение 660 В, то обмотку статора следует соединить звездой, а если 380 В, то треугольником. В обоих случаях напряжение на обмотке каждой фазы будет 380 В. Выводы обмоток фаз располагают на панели таким образом, чтобы соединения обмоток фаз было удобно выполнять посредством перемычек, без перекрещивания последних (рис. 28). В некоторых двигателях небольшой мощности в коробке выводов имеется лишь три зажима. В этом случае двигатель может быть включен в сеть на одно напряжение (соединение обмотки статора такого двигателя звездой или треугольником выполнено внутри двигателя).

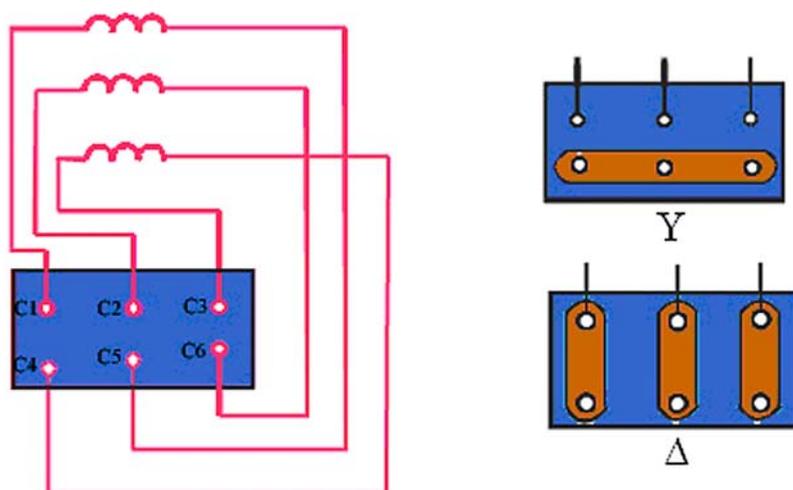


Рис. 28. Расположение выводов обмотки статора (а) и положение перемычек при соединении обмотки статора звездой и треугольником (б)

Монтаж двигателя в месте его установки осуществляется либо посредством лап 12, либо посредством фланца. В последнем случае на подшипниковом щите (обычно со стороны выступающего конца вала) делают фланец с отверстиями для крепления двигателя на рабочей машине. Для предохранения обслуживающего персонала от возможного поражения электрическим током двигатели снабжаются болтами заземления (не менее двух). Принципиальная схема включения в трехфазную сеть асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором показана на рисунке 29, а.

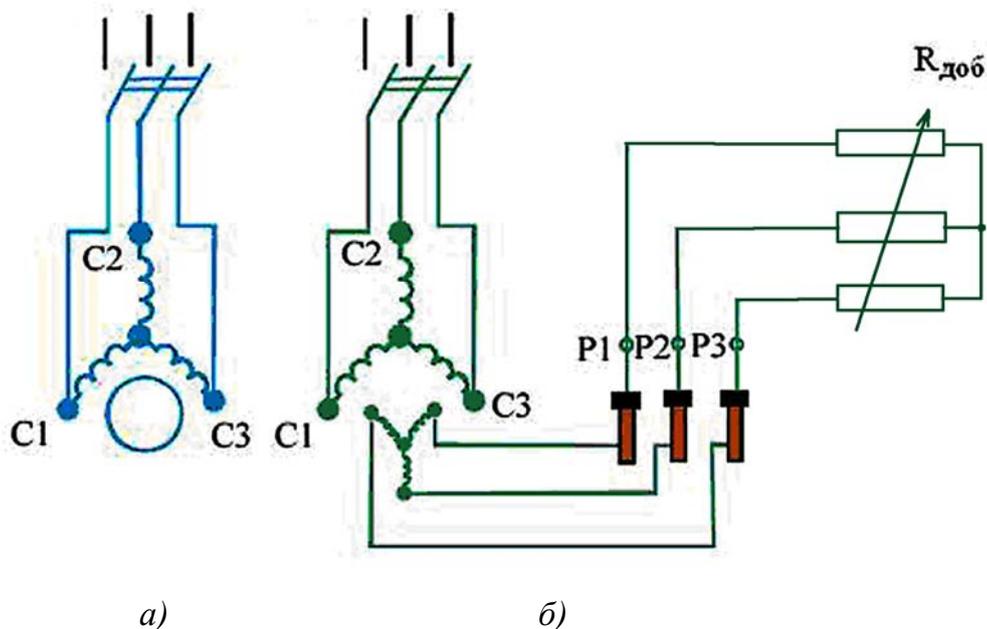


Рис. 29. Принципиальные схемы включения трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым (а) и фазным (б) ротором

Другая разновидность трехфазных асинхронных двигателей — двигатели с фазным ротором — конструктивно отличается от рассмотренного двигателя главным образом устройством ротора (рис. 30).

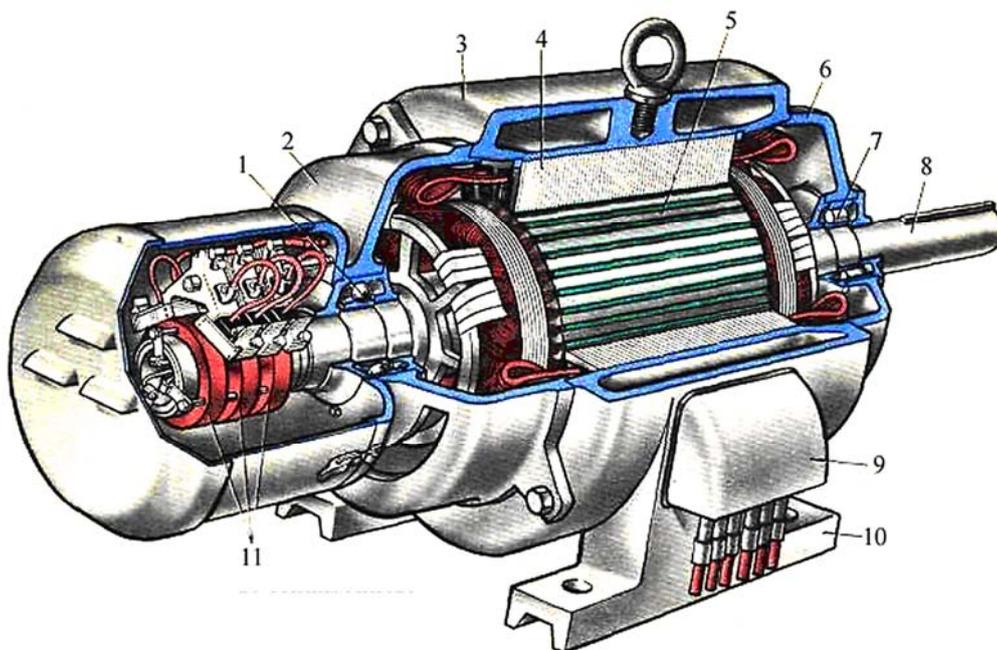


Рис. 30. Устройство трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором:
 1, 7 — подшипники; 2, 6 — подшипниковые щиты;
 3 — корпус; 4 — сердечник статора с обмоткой;
 5 — сердечник ротора; 8 — вал; 9 — коробка выводов;
 10 — лапы; 11 — контактные кольца

Статор этого двигателя также состоит из корпуса 3 и сердечника 4 с трехфазной обмоткой. У него имеются подшипниковые щиты 2 и 6 с подшипниками качения 1 и 7. К корпусу 3 прикреплены лапы 10 и коробка выводов 9. Однако ротор имеет более сложную конструкцию. На валу 8 закреплен шихтованный сердечник 5 с трехфазной обмоткой, выполненной аналогично обмотке статора. Эту обмотку соединяют звездой, а ее концы присоединяют к трем контактными кольцам 11, расположенным на валу и изолированным друг от друга и от вала.

Для осуществления электрического контакта с обмоткой вращающегося ротора на каждое контактное кольцо 1 (рис. 31) накладывают обычно две щетки 2, располагаемые в щеткодержателях 3. Каждый щеткодержатель снабжен пружинами, обеспечивающими прижатие щеток к контактному кольцу с определенным усилием.

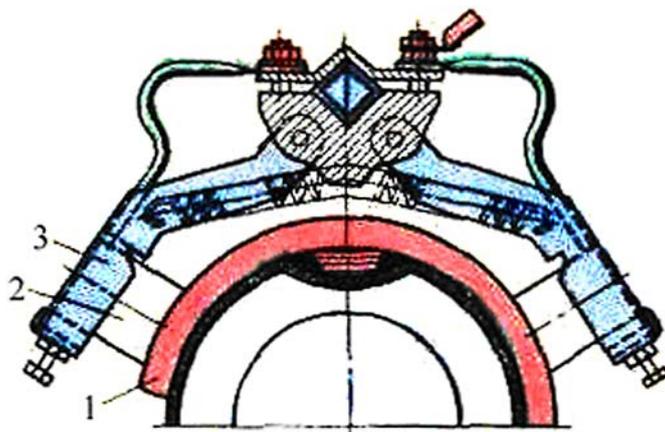


Рис. 31. Расположение щеткодержателей

Асинхронные двигатели с фазным ротором имеют более сложную конструкцию и менее надежны, но они обладают лучшими регулировочными и пусковыми свойствами, чем двигатели с короткозамкнутым ротором. Принципиальная схема включения в трехфазную сеть асинхронного двигателя с фазным ротором показана на рис. 29, б. Обмотка ротора этого двигателя соединена с пусковым реостатом ПРЧ, создающим в цепи ротора добавочное сопротивление $R_{доб}$.

На корпусе асинхронного двигателя прикреплена табличка, на которой указаны тип двигателя, завод-изготовитель, год выпуска и номинальные данные (полезная мощность, напряжение, ток, коэффициент мощности, частота вращения и КПД).

2.3. Принцип действия асинхронного двигателя

Неподвижная часть асинхронного двигателя — статор — имеет такую же конструкцию, что и статор синхронного генератора. В расточке статора расположена вращающаяся часть двигателя — ротор, состоящий из вала, сердечника и обмотки (рис. 32). Обмотка ротора представляет собой короткозамкнутую конструкцию состоящую из восьми алюминиевых стержней, расположенных в продольных пазах сердечника ротора, замкнутых с двух сторон по торцам ротора алюминиевыми кольцами (на рисунке эти кольца не показаны). Ротор и статор разделены воздушным зазором. При включении обмотки статора в сеть трехфазного тока возникает вращающееся магнитное поле статора, *синхронная частота вращения* которого n_1 определяется выражением:

$$n_1 = f_1 60/p,$$

где f_1 — частота ЭДС синхронного генератора, Гц;

p — число пар полюсов, в рассматриваемом генераторе два полюса, т.е. $p = 1$.

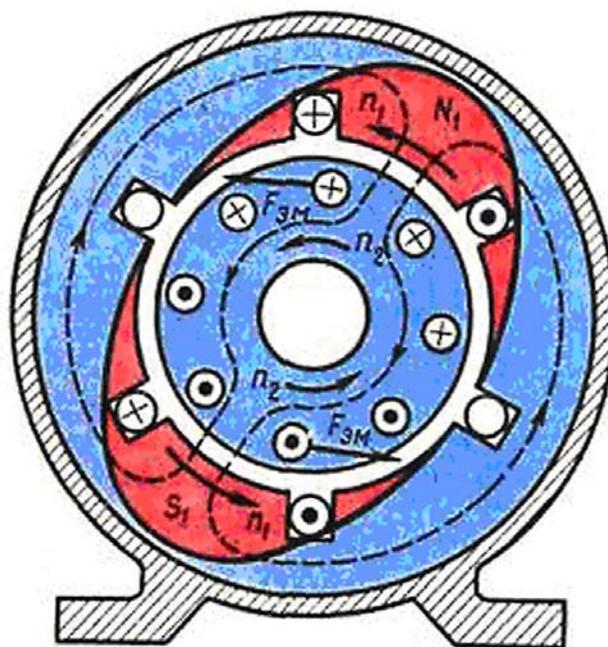


Рис. 32. К принципу действия асинхронного двигателя

Вращающееся поле статора (полюсы N_1 и S_1) сцепляется как с обмоткой статора, так и с обмоткой ротора и наводит в них ЭДС. ЭДС обмотки статора, являясь ЭДС самоиндукции, действует встречно приложенному к обмотке напряжению и ограничивает значение тока в обмотке. Обмотка ротора замкнута, поэтому ЭДС ротора создает в стержнях обмотки ротора токи. Взаимодействие этих токов с полем ста-

тора создает на роторе электромагнитные силы $F_{эм}$, направление которых определяют по правилу «левой руки». Из рисунка 32 видно, что силы $F_{эм}$ стремятся повернуть ротор в направлении вращения магнитного поля статора. Совокупность сил $F_{эм}$ создает на роторе электромагнитный момент M , приводящий его во вращение с частотой n_2 . Вращение ротора посредством вала передается исполнительному механизму.

Таким образом, электрическая энергия, поступающая из сети в обмотку статора, преобразуется в механическую энергию вращения ротора двигателя.

Направление вращения магнитного поля статора, а следовательно, и направление вращения ротора зависят от порядка следования фаз напряжения, подводимого к обмотке статора. Частота вращения ротора n_2 , называемая асинхронной, всегда меньше частоты вращения поля n_1 , так как только в этом случае происходит наведение ЭДС в обмотке ротора асинхронного двигателя.

Таким образом, статор синхронной машины не отличается от статора асинхронной машины, и выполняют они одинаковую функцию: при появлении в обмотке статора тока возникает вращающееся магнитное поле и в этой обмотке наводится ЭДС. Именно по этой причине изучение принципа выполнения и конструкции обмоток статора, а также изучение электромагнитных процессов, связанных с наведением в обмотке статора ЭДС и возникновением вращающегося магнитного поля, должно предшествовать изучению специфических вопросов теории асинхронных и синхронных машин.

2.4. Потери и коэффициент полезного действия асинхронного двигателя

Преобразование электрической энергии в механическую в асинхронном двигателе, как и в других электрических машинах, связано с потерями энергии, поэтому полезная мощность на выходе двигателя P_2 всегда меньше мощности на входе (потребляемой мощности) P_1 на величину потерь ΣP :

$$P_2 = P_1 - \Delta P.$$

Потери ΣP преобразуются в теплоту, что в конечном итоге ведет к нагреву машины. Потери в электрических машинах разделяются на основные и добавочные. Основные потери включают в себя магнитные, электрические и механические.

Магнитные потери P_m в асинхронном двигателе вызваны потерями на гистерезис и потерями на вихревые токи, происходящими в сердечнике при его перемагничивании. Величина магнитных потерь пропорциональна частоте перемагничивания $P_m = f$. Частота перемагничивания сердечника ста-

тора равна частоте тока в сети ($f = f_1$), а частота перемагничивания сердечника ротора $f = f_2 = f_1 s$. При частоте тока в сети $f_1 = 50$ Гц и номинальном скольжении $S_{ном} = 1 \div 8\%$ частота перемагничивания ротора $f = f_2 = 2 \div 4$ Гц, поэтому магнитные потери в сердечнике ротора настолько малы, что их в практических расчетах не учитывают.

Электрические потери в асинхронном двигателе вызваны нагревом обмоток статора и ротора проходящими по ним токами. Величина этих потерь пропорциональна квадрату тока в обмотке (Вт):

– электрические потери в обмотке статора

$$P_{\varepsilon 1} = m_1 I_1^2 r_1;$$

– электрические потери в обмотке ротора

$$P_{\varepsilon 2} = m_2 I_2^2 r_2 = m_2 I_2'^2 r_2',$$

здесь r_1 и r_2 — активные сопротивления обмоток фаз статора и ротора пересчитанные на рабочую температуру $t_{раб}$;

r_2' и I_2' — активное сопротивление ротора и ток ротора, приведенные к обмотке статора.

Сопротивление обмотки, пересчитанное под рабочую температуру

$$r_1 = r_{1,20} \left[1 + \alpha (t_{раб} - 20) \right], \quad r_2 = r_{2,20} \left[1 + \alpha (t_{раб} - 20) \right],$$

где $r_{1,20}$ и $r_{2,20}$ — активные сопротивления обмоток при температуре

$$t_{раб} = 20 \text{ } ^\circ\text{C};$$

α — температурный коэффициент, для меди и алюминия

$$\alpha = 0,004.$$

Электрические потери в роторе прямо пропорциональны скольжению:

$$P_{\varepsilon 2} = s P_{\varepsilon м},$$

где $P_{\varepsilon м}$ — электромагнитная мощность асинхронного двигателя, Вт:

$$P_{\varepsilon м} = P_1 - (P_m + P_{\varepsilon 1}).$$

Из этого следует, что работа асинхронного двигателя экономичнее при малых скольжениях, так как с ростом скольжения растут электрические потери в роторе.

В асинхронных двигателях с фазным ротором, помимо перечисленных электрических потерь, имеют место еще и электрические потери в щеточном контакте.

Механические потери $P_{мех}$ — это потери на трение в подшипниках и на вентиляцию. Величина этих потерь пропорциональна квадрату частоты вращения ротора ($P_{мех} = n^2$). В асинхронных двигателях с фазным ротором механические потери происходят еще и за счет трения между щетками и контактными кольцами ротора.

Добавочные потери включают в себя все виды трудно учитываемых потерь, вызванных действием высших гармоник МДС пульсацией магнитной индукции в зубцах и другими причинами. Добавочные потери асинхронных двигателей принимают равными 0,5% от подводимой к двигателю мощности P_1 :

$$P_{доб} = 0,005 P_1.$$

При расчете добавочных потерь для ненормального режима следует пользоваться выражением:

$$P'_{доб} = P_{доб} \beta^2,$$

где β — коэффициент нагрузки, $\beta = I_1/I_{1\text{ ном}}$.

Сумма всех потерь асинхронного двигателя, Вт:

$$\Sigma P = P_m + P_{\varepsilon 1} + P_{\varepsilon 2} + P_{\text{мех}} + P_{доб}.$$

На рисунке 33 представлена энергетическая диаграмма асинхронного двигателя, из которой видно, что часть подводимой к двигателю мощности $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos b_1$ затрачивается в статоре на магнитные P_m и электрические $P_{\varepsilon 1}$ потери. Оставшаяся после этого электромагнитная мощность передается на ротор, где частично расходуется на электрические потери $P_{\varepsilon 2}$ и преобразуется в полную механическую мощность P'_2 . Часть мощности идет на покрытие механических $P_{\text{мех}}$ и добавочных потерь $P_{доб}$, а оставшаяся часть этой мощности P_2 составляет полезную мощность двигателя.

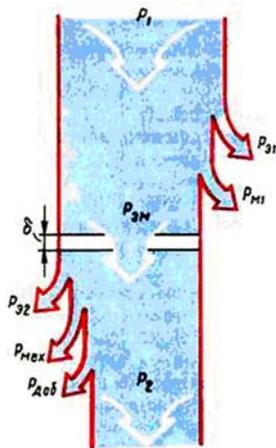


Рис. 33. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

У асинхронного двигателя КПД

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1}.$$

Электрические потери в обмотках $P_{\varepsilon 1}$ и $P_{\varepsilon 2}$ являются переменными потерями, так как их величина зависит от нагрузки двигателя, т.е. от значений токов в обмотках статора и ротора. Переменными являются

также и добавочные потери. Что же касается магнитных P_m и механических $P_{мех}$, то они практически не зависят от нагрузки (исключение составляют двигатели, у которых с изменением нагрузки в широком диапазоне меняется частота вращения).

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя с изменениями нагрузки также меняет свою величину: в режиме холостого хода КПД равен нулю, а затем с ростом максимума при нагрузке $(0,7 \div 0,8)P_{ном}$. При дальнейшем увеличении нагрузки КПД незначительно снижается, а при перегрузке ($P_2 > P_{ном}$) он резко убывает, что объясняется интенсивным ростом переменных потерь ($P_{э1} + P_{э2} + P_{доб}$), величина которых пропорциональна квадрату тока статора, и уменьшением коэффициента мощности. КПД трехфазных асинхронных двигателей общего назначения при номинальной нагрузке составляет: для двигателей мощностью от 1 до 10 кВт $\eta_{ном} = 75 \div 88\%$, для двигателей мощностью более 10 кВт $\eta_{ном} = 90 \div 94\%$.

2.5. Механические характеристики асинхронного двигателя

Электромагнитный момент асинхронного двигателя, а также его максимальное и пусковое значения пропорциональны квадрату напряжения, подводимого к обмотке статора: $M = U_1^2$. В то же время значение критического скольжения не зависит от напряжения U_1 (рис. 34). Это дает нам возможность построить механические характеристики $M = f(s)$ для разных значений напряжения U_1 , из которых следует, что колебания напряжения сети U_1 относительно его номинального значения $U_{1 ном}$ сопровождаются не только изменениями максимального и пускового моментов, но и изменениями частоты вращения ротора.

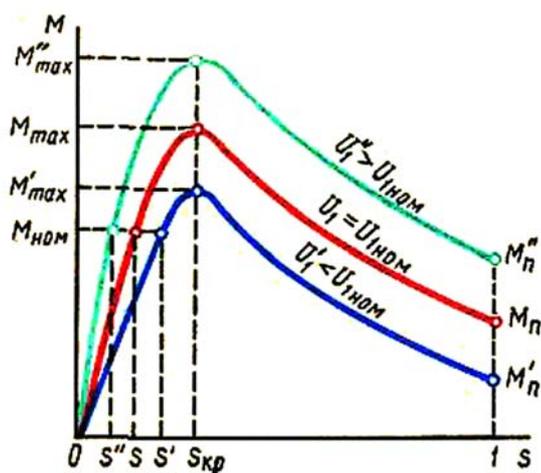


Рис. 34. Влияние напряжения на вид механической характеристики асинхронного двигателя

С уменьшением напряжения сети частота вращения ротора снижается (скольжение увеличивается). Напряжение U_1 влияет на значение максимального момента M_{max} , а также на перегрузочную способность двигателя $\lambda = M_{max}/M_{ном}$. Так, если напряжение U_1 понизилось на 30%, т.е. $U_1 = 0,7U_{1ном}$, то максимальный момент двигателя уменьшится более чем вдвое: $M'_{max} = 0,7^2 M_{max} = 0,49 M_{max}$. На сколько же уменьшится перегрузочная способность двигателя? Если, например, при номинальном напряжении сети перегрузочная способность $\lambda = M_{max}/M_{ном} = 2$, то при понижении напряжения на 30% перегрузочная способность двигателя

$$\lambda' = \frac{M'_{max}}{M_{ном}} = 0,49 \frac{M_{max}}{M_{ном}} = 0,49 \cdot 2 = 0,98,$$

т.е. двигатель не в состоянии нести даже номинальную нагрузку.

Значение максимального момента двигателя не зависит от активного сопротивления ротора r'_2 . Что же касается критического скольжения $S_{кр}$, то, как это видно из рисунка 35, оно пропорционально сопротивлению r'_2 . Таким образом, если в асинхронном двигателе постепенно увеличивать активное сопротивление цепи ротора, то значение максимального момента будет оставаться неизменным, а критическое скольжение будет увеличиваться (см. рис. 35). При этом пусковой момент двигателя M_n возрастает с увеличением сопротивления r'_2 до некоторого значения. На рисунке 35 это соответствует сопротивлению r'_{2III} , при котором пусковой момент равен максимальному. При дальнейшем увеличении сопротивления r'_2 пусковой момент уменьшается.

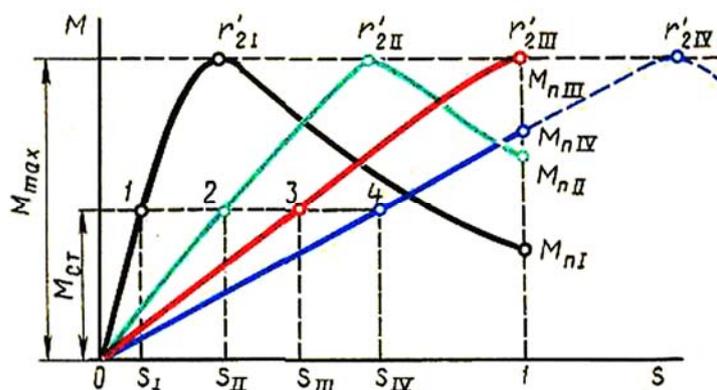


Рис. 35. Влияние активного сопротивления обмотки ротора на механическую характеристику асинхронного двигателя

Анализ графиков $M = f(s)$, приведенных на рисунке 35, также показывает, что изменения сопротивления ротора r'_2 сопровождаются изменениями частоты вращения: с увеличением r'_2 при неизменном нагрузочном моменте $M_{ст}$ скольжение увеличивается, т.е. частота вращения уменьшается (точки 1, 2, 3 и 4).

Влияние активного сопротивления обмотки ротора на форму механических характеристик асинхронных двигателей используется при проектировании двигателей. Например, асинхронные двигатели общего назначения должны иметь «жесткую» скоростную характеристику, т.е. работать с небольшим номинальным скольжением. Это достигается применением в двигателе обмотки ротора с малым активным сопротивлением r'_2 . При этом двигатель имеет более высокий КПД за счет снижения электрических потерь в обмотке ротора ($P_{\text{э}2} = m_1 I_2'^2 r'_2$). Выбранное значение r'_2 должно обеспечить двигателю требуемое значение пускового момента. При необходимости получить двигатель с повышенным значением пускового момента увеличивают активное сопротивление обмотки ротора. Но при этом получают двигатель с большим значением номинального скольжения, а следовательно, с меньшим КПД.

Рассмотренные зависимости $M = f(U_1)$ и $M = f(r'_2)$ имеют также большое практическое значение при рассмотрении вопросов пуска и регулирования частоты вращения асинхронных двигателей.

2.6. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Рабочие характеристики асинхронного двигателя (рис. 36) представляют собой графически выраженные зависимости частоты вращения n_2 , КПД η , полезного момента (момента на валу) M_2 , коэффициента мощности $\cos \phi_1$ и тока статора от полезной мощности P_2 при $U_1 = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$.

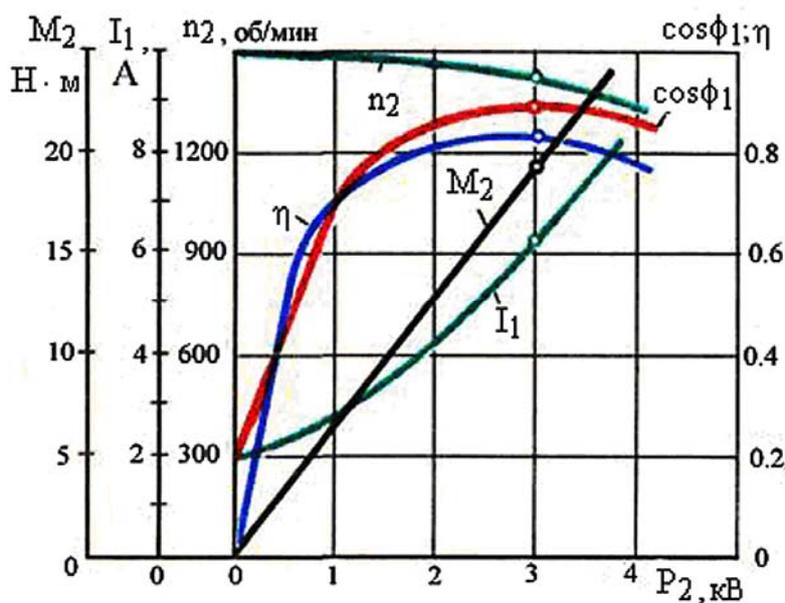


Рис. 36. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Скоростная характеристика $n_2 = f(P_2)$. Частота вращения ротора асинхронного двигателя $n_2 = n_1(1 - s)$.

Скольжение определяются формулами

$$s = (n_1 - n_2)/n_1 \quad \text{или} \quad s = P_{\text{э2}}/P_{\text{эм}},$$

т.е. скольжение двигателя, а следовательно, и его частота вращения определяются отношением электрических потерь в роторе к электромагнитной мощности $P_{\text{эм}}$. Пренебрегая электрическими потерями в роторе в режиме холостого хода, можно принять $P_{\text{эм2}} = 0$, а поэтому $s_0 = 0$ и $n_{20} \approx n_1$. По мере увеличения нагрузки на валу двигателя отношение растет, достигая значений 0,01-0,08 при номинальной нагрузке. В соответствии с этим зависимость $n_2 = f(P_2)$ представляет собой кривую, слабо наклоненную к оси абсцисс. Однако при увеличении активного сопротивления ротора r'_2 угол наклона этой кривой увеличивается. В этом случае изменения частоты вращения при колебаниях нагрузки P_2 возрастают.

Зависимость $M_2 = f(P_2)$. Зависимость полезного момента на валу двигателя M_2 от полезной мощности P_2 определяется выражением

$$M_2 = P_2/\omega_2 = 60P_2/(2\pi n_2) = 9,55P_2/n_2,$$

где P_2 — полезная мощность, Вт;

ω_2 — угловая частота вращения ротора:

$$\omega_2 = 2\pi f_2/60.$$

Из этого выражения следует, что если $n_2 = \text{const}$, то график $M_2 = f_2(P_2)$ представляет собой прямую линию. Но в асинхронном двигателе с увеличением нагрузки P_2 частота вращения ротора уменьшается, а поэтому полезный момент на валу M_2 с увеличением нагрузки возрастает несколько быстрее нагрузки, а следовательно, график $M_2 = f(P_2)$ имеет криволинейный вид.

Зависимость $\cos \varphi_1 = f(P_2)$. В связи с тем, что ток статора I_1 имеет реактивную (индуктивную) составляющую, необходимую для создания магнитного поля в статоре, коэффициент мощности асинхронных двигателей меньше единицы. Наименьшее значение коэффициента мощности соответствует режиму х.х. Объясняется это тем, что составляющая тока х.х. I_0 при любой нагрузке остается практически неизменным. Поэтому при малых нагрузках двигателя ток статора невелик и в значительной части является реактивным ($I_1 \approx I_0$). В результате сдвиг по фазе тока статора I_1 относительно напряжения \dot{U}_1 получается значительным ($\varphi_1 \approx \varphi_0$), лишь немногим меньше 90° (рис. 37). Коэффициент мощности асинхронных двигателей в режиме х. х. обычно не превышает 0,2.

При увеличении нагрузки на валу двигателя растет активная составляющая тока I_1 и коэффициент мощности возрастает, достигая наибольшего значения (0,80-0,90) при нагрузке, близкой к номинальной. Дальнейшее

увеличение нагрузки сопровождается уменьшением $\cos \varphi_1$, что объясняется возрастанием индуктивного сопротивления ротора (x_2s) за счет увеличения скольжения, а следовательно, и частоты тока в роторе. В целях повышения коэффициента мощности асинхронных двигателей чрезвычайно важно, чтобы двигатель работал всегда или по крайней мере значительную часть времени с нагрузкой, близкой к номинальной. Это можно обеспечить лишь при правильном выборе мощности двигателя. Если же двигатель работает значительную часть времени недогруженным, то для повышения $\cos \varphi_1$ целесообразно подводимое к двигателю напряжение U_1 уменьшить. Например, в двигателях, работающих при соединении обмотки статора треугольником, это можно сделать пересоединив обмотки статора в звезду, что вызовет уменьшение фазного напряжения в $\sqrt{3}$ раз. При этом магнитный поток статора, а следовательно, и намагничивающий ток уменьшаются примерно в $\sqrt{3}$ раз. Кроме того, активная составляющая тока статора несколько увеличивается. Все это способствует повышению коэффициента мощности двигателя. На рисунке 37 представлены графики зависимости $\cos \varphi_1$ асинхронного двигателя от нагрузки при соединении обмоток статора звездой (кривая 1) и треугольником (кривая 2).

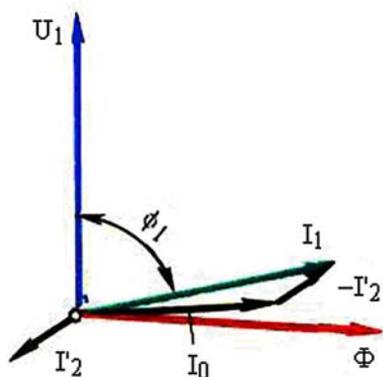


Рис. 36. Векторная диаграмма асинхронного двигателя при небольшой нагрузке

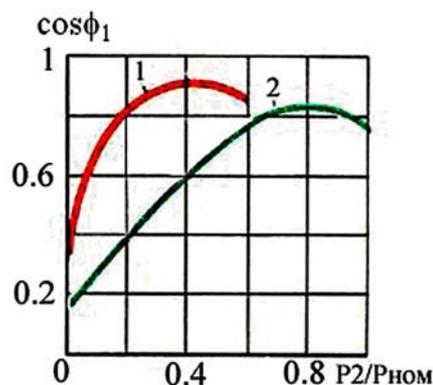


Рис. 37. Зависимость косинуса от нагрузки при соединении обмотки статора звездой и треугольником

2.7. Пуск двигателей с фазным ротором

Пусковые свойства двигателей. Пуск асинхронного двигателя сопровождается переходным процессом, обусловленным переходом ротора, и механически связанных с ним частей исполнительного механизма, из состояния покоя в состояние равномерного вращения, когда вращающий момент двигателя уравнивается суммой противодействующих моментов, действующих на ротор двигателя.

Пусковые свойства двигателя определяются в первую очередь значением пускового тока I_n или его кратностью $I_n/I_{ном}$ и значением пускового момента M_n или его кратностью $M_n/M_{ном}$. Двигатель, обладающий хорошими пусковыми свойствами, развивает значительный пусковой момент при сравнительно небольшом пусковом токе. Однако получение такого сочетания пусковых параметров в асинхронном двигателе сопряжено с определенными трудностями, а иногда оказывается невозможным.

В начальный момент пуска скольжение $s = 1$, поэтому, пренебрегая током х.х., пусковой ток можно определить, подставив $s = 1$:

$$I_n = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2}}.$$

Пусковой момент

$$M_n = \frac{m_1 U_1^2 r'_2 p}{2\pi f_1 [(r_1 + r'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2]}.$$

Из этих выражений следует, что улучшить пусковые свойства двигателя можно увеличением активного сопротивления цепи ротора, так как в этом случае уменьшение пускового тока сопровождается увеличением пускового момента. В то же время напряжение U_1 по-разному влияет на пусковые параметры двигателя: с уменьшением U_1 пусковой ток уменьшается, что благоприятно влияет на пусковые свойства двигателя, но одновременно уменьшается пусковой момент. Целесообразность применения того или иного способа улучшения пусковых свойств двигателя определяется конкретными условиями эксплуатации двигателя и требованиями, которые предъявляются к его пусковым свойствам.

Помимо пусковых значений тока I_n и момента M_n пусковые свойства двигателей оцениваются еще и такими показателями, как продолжительность и плавность пуска, сложность пусковой операции, ее экономичность (стоимость и надежность пусковой аппаратуры и потери энергии в ней).

Пуск двигателей с фазным ротором. Наличие контактных колец. У двигателей с фазным ротором позволяет подключить к обмотке ротора пусковой реостат (ПР). При этом активное сопротивление цепи ротора увеличивается до значения $R_2 = r'_2 + r'_{\partial}$, где r'_{∂} — электрическое сопротивление пускового реостата, приведенное к обмотке статора, что влияет на пусковой момент двигателя M_n . Это влияние графически показано на рисунке 39, из которого видно, что если при отсутствии ПР, т.е. при активном сопротивлении цепи ротора $R'_2 = r'_2$, пусковой момент $M_n = M_{но}$, то при введении в цепь ротора добавочного активного сопротивления $r'_{\partial об}$, когда $R'_2 = r'_2 + r'_{\partial об}$ пусковой момент возрастает и при $R''_2 = r'_2 + r'_{\partial об} = x_1 + x'_2$ достигает наибольшего значения $M_{n.наиб}$. При $R'_2 > x_1 + x'_2$ пусковой момент уменьшается.

При выборе сопротивления пускового реостата $r_{\text{дmax}}$ исходят из условий пуска двигателя: если двигатель включают при значительном нагрузочном моменте на валу, сопротивление пускового реостата $r_{\text{дmax}}$ выбирают таким, чтобы обеспечить наибольший пусковой момент. Если же двигатель включают при небольшом нагрузочном моменте на валу, когда пусковой момент не имеет решающего значения для пуска, оказывается целесообразным сопротивление ПР $r_{\text{дmax}}$ выбирать несколько больше значения, соответствующего наибольшему пусковому моменту, т.е. чтобы $R'_2 > x_1 + x'_2$. В этом случае пусковой момент оказывается несколько меньшим наибольшего значения $M_{\text{нmax}}$, но зато пусковой ток значительно уменьшается.

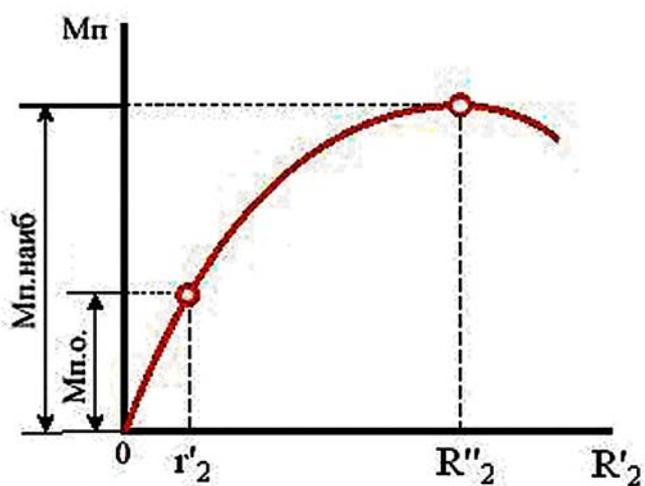


Рис. 39. Зависимость пускового момента от активного сопротивления цепи ротора

На рисунке 40, а показана схема включения ПР в цепь фазного ротора. В процессе пуска двигателя ступени ПР переключают таким образом, чтобы ток ротора оставался приблизительно неизменным, а среднее значение пускового момента было близко к наибольшему.

На рисунке 40, б представлен график изменения пускового момента асинхронного двигателя при четырех ступенях пускового реостата. Так, в начальный момент пуска (первая ступень реостата) пусковой момент равен $M_{\text{нmax}}$. По мере разгона двигателя его момент уменьшается по кривой 1. Как только значение момента уменьшится до значения $M_{\text{нmin}}$, рычаг реостата переводят на вторую ступень, и сопротивление реостата уменьшается. Теперь зависимость $M = f(s)$ выражается кривой 2 и пусковой момент двигателя вновь достигает $M_{\text{нmax}}$. Затем ПР переключают на третью и на четвертую ступени (кривые 3 и 4). После того как электромагнитный момент двигателя уменьшится до значения, равного значению противодействующего момента на валу двигателя, частота вращения ротора достигнет установившегося значения и процесс пуска двигателя будет закончен. Таким

образом, в течение всего процесса пуска значение пускового момента остается приблизительно постоянным, равным $M_{n,cr}$. Следует иметь в виду, что при слишком быстром переключении ступеней реостата пусковой ток может достигнуть недопустимо больших значений.

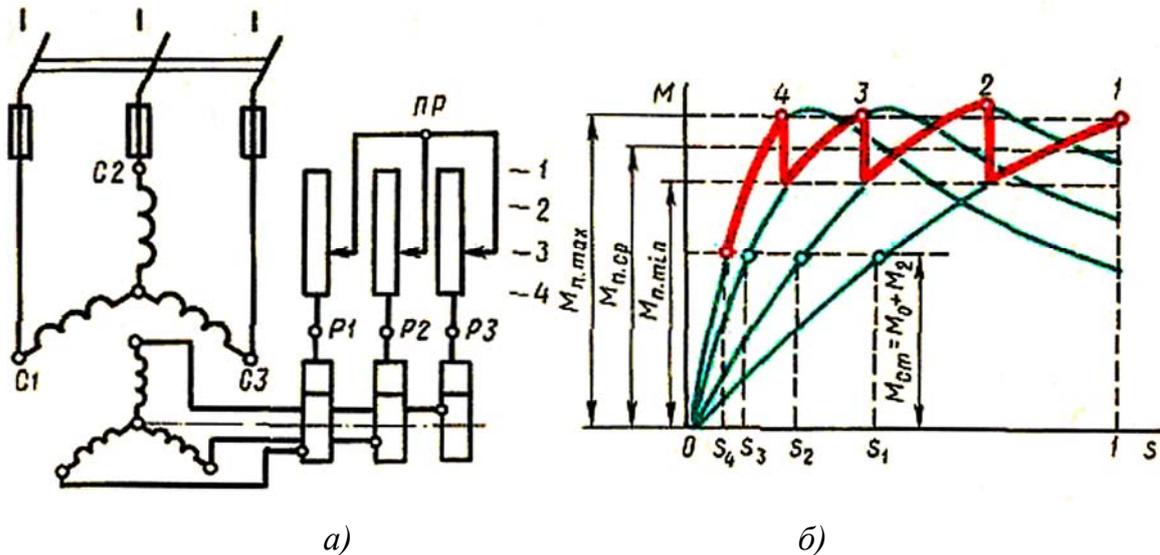


Рис. 40. Схема включения пускового реостата (а) и построение графика пускового момента (б) асинхронного двигателя с фазным ротором

Пусковые реостаты состоят из кожуха, рычага с переключающим устройством и сопротивлений, выполненных из металлической проволоки или ленты, намотанной в виде спирали, или же из чугунного литья. Пусковые реостаты рассчитаны на кратковременное протекание тока, а поэтому рычаг пускового реостата нельзя долго задерживать на промежуточных ступенях, так как сопротивления реостата могут перегореть. По окончании процесса пуска, когда рычаг реостата находится на последней ступени, обмотка ротора замкнута накоротко.

В заключение отметим, что в асинхронных двигателях с фазным ротором обеспечивается наиболее благоприятное соотношение между пусковым моментом и пусковым током: большой пусковой момент при небольшом пусковом токе (в 2-3 раза больше номинального). Недостатками пусковых свойств двигателей с фазным ротором являются некоторая сложность, продолжительность и неэкономичность пусковой операции. Последнее вызывается необходимостью применения в схеме двигателя пускового реостата и непроизводительным расходом электроэнергии при его нагреве.

2.8. Пуск двигателей с короткозамкнутым ротором

Пуск непосредственным включением в сеть (рис. 41). Этот способ пуска, отличающийся простотой, имеет существенный недостаток: в момент подключения двигателя к сети в обмотке статора возникает большой пусковой ток, в 5-7 раз превышающий номинальный ток двигателя. При небольшой инерционности исполнительного механизма частота вращения двигателя быстро достигает установившегося значения и пусковой ток также быстро падает, не вызывая перегрева обмотки статора. Но такой значительный бросок тока в питающей сети может вызвать в ней заметное падение напряжения. Однако этот способ пуска благодаря своей простоте получил наибольшее применение для двигателей мощностью до 38-50 кВт и более (при достаточном сечении жил токоподводящего кабеля). При необходимости уменьшения пускового тока двигателя применяют какой-либо из способов пуска короткозамкнутых двигателей при пониженном напряжении.

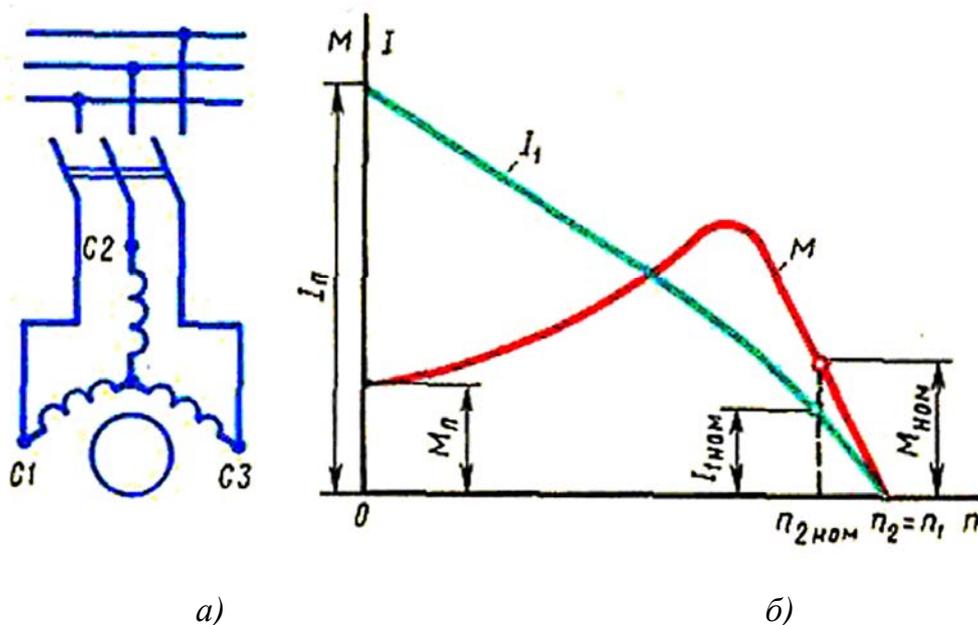


Рис. 41. Схема непосредственного включения в сеть (а) и графики изменения тока и момента при пуске (б) асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Пуск при пониженном напряжении. Пусковой ток двигателя пропорционален подведенному напряжению U_1 , уменьшение которого вызывает соответствующее уменьшение пускового тока. Существует несколько способов понижения подводимого к двигателю напряжения. Рассмотрим некоторые из них.

Для асинхронных двигателей, работающих при соединении обмоток статора треугольником, можно применить *пуск переключением обмотки статора со звезды на треугольник* (рис. 42, а). В момент подключения двигателя к сети переключатель ставят в положение «звезда», при котором обмотка статора оказывается соединенной в звезду. При этом фазное напряжение на статоре понижается в $\sqrt{3}$ раз. Во столько же раз уменьшается и ток в фазных обмотках двигателя (рис. 42, б). Кроме того, при соединении обмоток звездой линейный ток равен фазному, в то время как при соединении этих же обмоток треугольником линейный ток больше фазного в $\sqrt{3}$ раз. Следовательно, переключив обмотки статора звездой, мы добиваемся уменьшения линейного тока в $(\sqrt{3})^2 = 3$ раза. После того как ротор двигателя разгонится до частоты вращения, близкой к установившейся, переключатель быстро переводят в положение «треугольник» и фазные обмотки двигателя оказываются под номинальным напряжением. Возникший при этом бросок тока является незначительным.

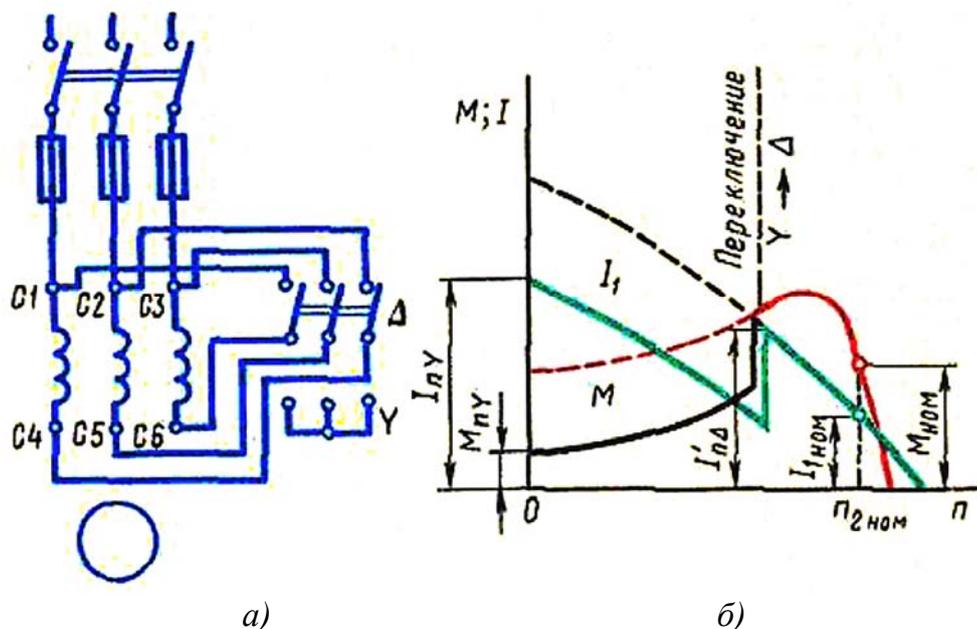


Рис. 42. Схема включения (а) и графики изменения момента и тока (фазного) при пуске (б) асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором переключением обмотки статора со звезды на треугольник

Рассмотренный способ пуска имеет существенный недостаток — уменьшение фазного напряжения в $\sqrt{3}$ раз сопровождается уменьшением пускового момента в три раза, так как пусковой момент асинхронного двигателя прямо пропорционален квадрату напряжения U_1 . Такое значительное уменьшение пускового момента не позволяет применять этот способ пуска для двигателей, включаемых в сеть при значительной нагрузке на валу.

Описанный способ понижения напряжения при пуске применим лишь для двигателей, работающих при соединении обмотки статора треугольником. Более универсальным является способ пуска *понижением подводимого к двигателю напряжения посредством реакторов* (реактивных катушек — дросселей). Порядок включения двигателя в этом случае следующий (рис. 43, а). При разомкнутом рубильнике 2 включают рубильник 1. При этом ток из сети поступает в обмотку статора через реакторы P , на которых происходит падение напряжения $jI_n x_p$ (где x_p — индуктивное сопротивление реактора, Ом). В результате на обмотку статора подается пониженное напряжение $U'_1 = U_{1\text{ном}} - jI_n x_p$. После разгона ротора двигателя включают рубильник 2, и подводимое к обмотке статора напряжение оказывается номинальным.

Недостаток этого способа пуска состоит в том, что уменьшение напряжения в $U'_1 = U_{1\text{ном}}$ раз сопровождается уменьшением пускового момента M_n в $U'_1/U_{1\text{ном}}$.

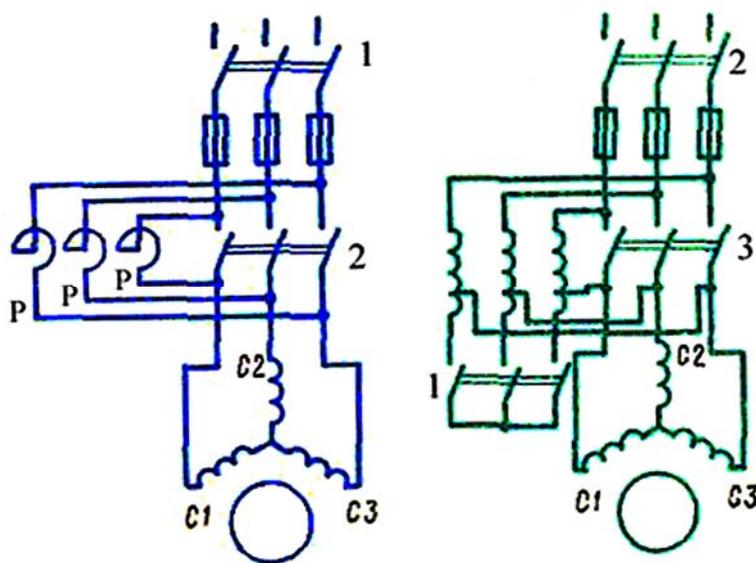


Рис. 43. Схемы реакторного (а) и автотрансформаторного (б) способов пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

При пуске двигателя через *понижающий автотрансформатор* (рис. 43, б) вначале замыкают рубильник 1, соединяющий обмотки автотрансформатора звездой, а затем включают рубильник 2, и двигатель оказывается подключенным на пониженное напряжение U'_1 .

При этом пусковой ток двигателя, измеренный на выходе автотрансформатора, уменьшается в K_A раз, где K_A — коэффициент трансформации автотрансформатора. Что же касается тока в питающей двигатель сети, т.е. тока на входе автотрансформатора, то он уменьшается в K_A^2 раз по сравнению с пусковым током при непосредственном включении двигателя в сеть. Дело в том, что в понижающем автотрансфор-

маторе первичный ток меньше вторичного в K_A раз и поэтому уменьшение пускового тока при автотрансформаторном пуске составляет $K_A \cdot K_A = K_A^2$ раз. Например, если кратность пускового тока асинхронного двигателя при непосредственном его включении в сеть составляет $I_n/I_{ном} = 6$, а напряжение сети 380 В, то при автотрансформаторном пуске с понижением напряжения до 220 В кратность пускового тока в сети $I'_n/I_{ном} = 6/(380/220)^2 = 2$.

После первоначального разгона ротора двигателя рубильник 1 размыкают, и автотрансформатор превращается в реактор. При этом напряжение на выводах обмотки статора несколько повышается, но все же остается меньше номинального. Включением рубильника 3 на двигатель подается полное напряжение сети. Таким образом, автотрансформаторный пуск проходит тремя ступенями: на первой ступени к двигателю подводится напряжение $U_1 = (0,5 \div 0,60)U_{ном}$, на второй — $U_1 = (0,70 \div 0,80)U_{ном}$ и, наконец, на третьей ступени к двигателю подводится номинальное напряжение $U_{ном}$.

Как и предыдущие способы пуска при пониженном напряжении, автотрансформаторный способ пуска сопровождается уменьшением пускового момента, так как значение последнего прямо пропорционально квадрату напряжения. С точки зрения уменьшения пускового тока автотрансформаторный способ пуска лучше реакторного, так как при реакторном пуске пусковой ток в питающей сети уменьшается в $U'_1/U_{ном}$, а при автотрансформаторном — $(U'_1/U_{ном})^2$ раз. Но некоторая сложность пусковой операции и повышенная стоимость пусковой аппаратуры (понижающий автотрансформатор и переключающая аппаратура) несколько ограничивают применение этого способа пуска асинхронных двигателей.

2.9. Асинхронные двигатели с улучшенными пусковыми характеристиками

Стремление улучшить пусковые свойства асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором привело к созданию асинхронных двигателей с особой конструкцией ротора: двигателей с глубокими пазами на роторе и двигателей с двумя короткозамкнутыми клетками на роторе.

Двигатель с глубокими пазами на роторе. От обычного асинхронного двигателя этот двигатель отличается тем, что у него пазы ротора сделаны в виде узких глубоких щелей, в которые вложены стержни обмотки ротора, представляющие собой узкие полосы. С обеих сторон эти стержни приварены к замыкающим кольцам. Обычно глубокий паз имеет соотношение размеров $h_n/b_n = 9 \div 10$, где h_n , b_n — высота и ширина паза.

В момент включения двигателя, когда частота тока в роторе имеет наибольшее значение ($f_2 = f_1$), индуктивное сопротивление нижней части каждого стержня значительно больше верхней. Объясняется это тем, что нижняя часть стержня сцеплена с большим числом магнитных силовых линий поля рассеяния (рис. 44, а). На рис. 44, б показан график распределения плотности пускового тока в стержне ротора с глубокими пазами по высоте стержня. Из этого графика следует, что почти весь ток ротора проходит по верхней части стержня, поперечное сечение которой намного меньше сечения всего стержня. Это равноценно увеличению активного сопротивления стержня ротора, что, как известно, способствует росту пускового момента двигателя и некоторому ограничению пускового тока.

Таким образом, двигатель с глубокими пазами на роторе обладает благоприятным соотношением пусковых параметров; большим пусковым моментом при сравнительно небольшом пусковом токе. По мере нарастания частоты вращения ротора частота тока в роторе убывает ($f_2 = sf_1$).

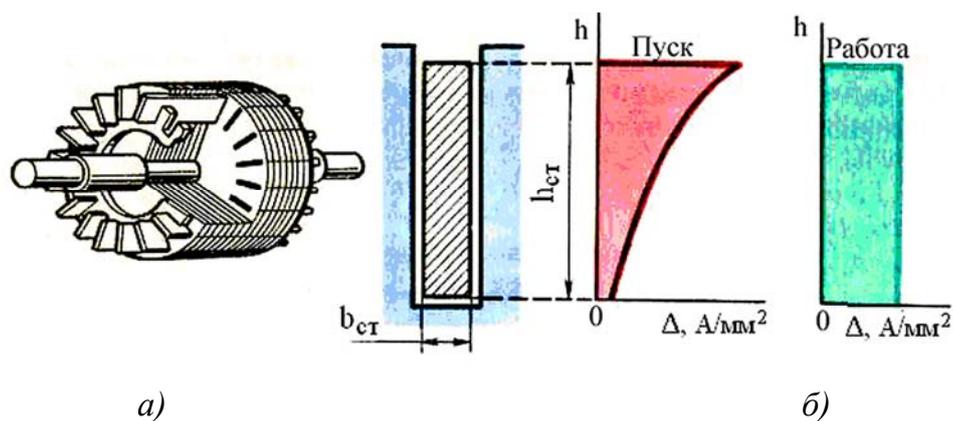


Рис. 44. Ротор с глубокими пазами:
 а — устройство; б — распределение плотности тока ротора по высоте стержня при пуске и работе двигателя

В связи с этим уменьшается индуктивное сопротивление обмотки ротора $x_2 = f_2$. Распределение плотности тока по высоте стержня в том случае становится более равномерным, что ведет к уменьшению активного сопротивления ротора. При работе двигателя с номинальной частотой вращения, когда $f_2 \ll f_1$, процесс «вытеснения» тока практически прекращается и двигатель работает как обычный короткозамкнутый.

Эффект вытеснения тока хорошо проявляется при пазах ротора бутылочной формы (рис. 45). В этом случае «вытеснение» тока происходит в верхнюю часть паза, имеющую меньшее сечение, а следовательно, большее активное сопротивление. Применение пазов бутылочной формы позволяет сократить высоту пазов ротора, а следовательно, уменьшить диаметр ротора по сравнению с глубокопазным ротором.

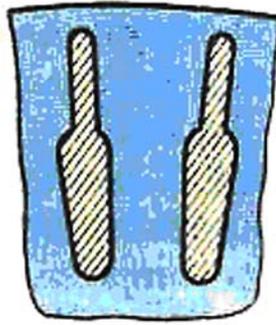


Рис. 45. Бутылочная форма стержней ротора

Двигатель с двумя клетками на роторе. Еще лучшими пусковыми свойствами обладают асинхронные двигатели с двумя короткозамкнутыми клетками на роторе (рис. 46, а): рабочей клеткой 1, стержни которой расположены в нижнем слое, и пусковой клеткой 2, стержни которой расположены в верхнем слое, ближе к воздушному зазору.

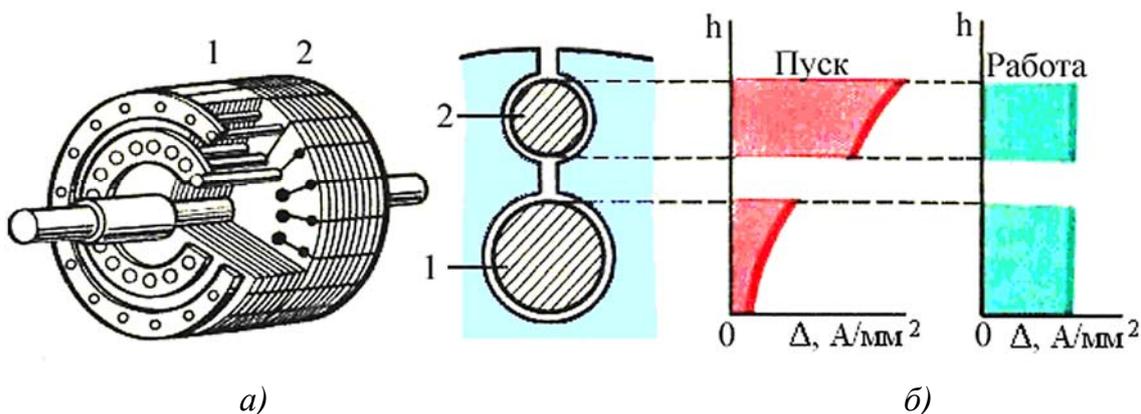


Рис. 46. Двухклеточный ротор:
а — устройство; б — распределение плотности тока в рабочей и пусковой клетках при пуске и работе двигателя

Стержни пусковой клетки обычно выполняют из латуни или бронзы — материалов, обладающих более высоким, чем у меди, активным сопротивлением. Индуктивное сопротивление рассеяния пусковой клетки невелико, так как ее стержни расположены вблизи воздушного зазора и к тому же с двух сторон имеют воздушные щели (см. рис. 46, б). Стержни рабочей клетки выполняют из меди, и по сравнению со стержнями пусковой клетки они имеют большее сечение. Это обеспечивает рабочей клетке малое активное сопротивление. Но зато индуктивное сопротивление рабочей клетки больше, чем у пусковой, особенно в начальный период пуска, когда частота тока в роторе сравнительно велика ($f_2 = f_1$).

В момент пуска двигателя ток ротора проходит в основном по верхней (пусковой) клетке, обладающей малым индуктивным сопротивлением. При этом плотность тока в стержнях пусковой клетки намного больше плотности тока в стержнях рабочей клетки (см. рис. 46, б). Повышенное активное сопротивление этой клетки обеспечивает двигателю значительный пусковой момент при пониженном пусковом токе. По мере увеличения частоты вращения ротора уменьшается частота тока в роторе, при этом индуктивное сопротивление рабочей клетки уменьшается, и распределение плотности тока в стержнях пусковой и рабочей клеток становится почти одинаковым. В итоге происходит перераспределение вращающего момента между клетками: если в начальный период пуска момент создается главным образом токами пусковой клетки, то по окончании периода пуска вращающий момент создается в основном токами рабочей клетки. Так как активные сопротивления клеток ротора неодинаковы, то зависимость $M = f(s)$ этих клеток изображается разными кривыми (рис. 47). Максимальное значение момента пусковой клетки вследствие ее повышенного активного сопротивления смещено в сторону скольжений, близких к единице.

Вращающие моменты от обеих клеток направлены в одну сторону, поэтому результирующий момент двигателя равен сумме моментов пусковой $M_{п.к}$ и рабочей $M_{раб.к}$ клеток:

$$M = M_{п.к} + M_{раб.к}$$

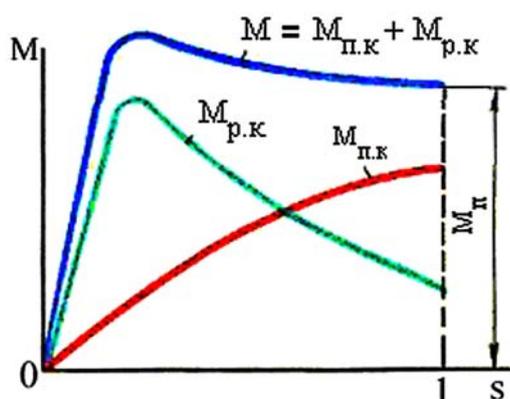


Рис. 47. Механическая характеристика двухклеточного асинхронного двигателя

Двигатели с двумя клетками на роторе, по сравнению с асинхронными двигателями обычной конструкции, имеют повышенную стоимость, что объясняется сложностью конструкции.

2.10. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей

Частота вращения ротора n_2 асинхронного двигателя:

$$n_2 = n_1(1 - s) = (f_1 60/p) (1 - s).$$

Из этого выражения следует, что частоту вращения ротора асинхронного двигателя можно регулировать изменением какой-либо из трех величин: скольжения s , частоты тока в обмотке статора f_1 или числа полюсов в обмотке статора $2p$.

Регулирование частоты вращения изменением скольжения s возможно *пятью способами*: изменением подводимого к обмотке статора напряжения, нарушением симметрии этого напряжения и изменением активного сопротивления обмотки ротора. Регулировка частоты вращения изменением скольжения происходит только в нагруженном двигателе. В режиме холостого хода скольжение, а следовательно, и частота вращения остаются практически неизменными.

Регулирование частоты вращения изменением подводимого напряжения. Возможность этого способа регулирования подтверждается графиками $M = f(s)$, построенными для разных значений U_1 . При неизменной нагрузке на валу двигателя увеличение подводимого к двигателю напряжения вызывает рост частоты вращения. Однако диапазон регулирования частоты вращения получается небольшим, что объясняется узкой зоной устойчивой работы двигателя, ограниченным значением критического скольжения и недопустимостью значительного превышения номинального значения напряжения. Последнее объясняется тем, что с превышением номинального напряжения возникает опасность чрезмерного перегрева двигателя, вызванного резким увеличением электрических и магнитных потерь. В то же время с уменьшением напряжения U_1 двигатель утрачивает перегрузочную способность, которая, как известно, пропорциональна квадрату напряжения сети.

Подводимое к двигателю напряжение изменяют либо регулировочным автотрансформатором, либо реакторами, включаемыми в разрыв линейных проводов.

Узкий диапазон регулирования и неэкономичность (необходимость в дополнительных устройствах) ограничивают область применения этого способа регулирования частоты вращения.

Регулирование частоты вращения нарушением симметрии подводимого напряжения. При нарушении симметрии подводимой к двигателю трехфазной системы напряжения вращающееся поле статора становится эллиптическим. При этом поле приобретает обратную составляющую (встречное поле), которая создает момент $M_{обр}$, направленный встречно вращающему моменту $M_{пр}$. В итоге результирующий электромагнитный момент двигателя уменьшается ($M = M_{пр} - M_{обр}$).

Механические характеристики двигателя при этом способе регулирования располагаются в зоне между характеристикой при симметричном напряжении (рис. 48, а, кривая 1) и характеристикой при однофазном питании двигателя (кривая 2) — пределом несимметрии трехфазного напряжения.

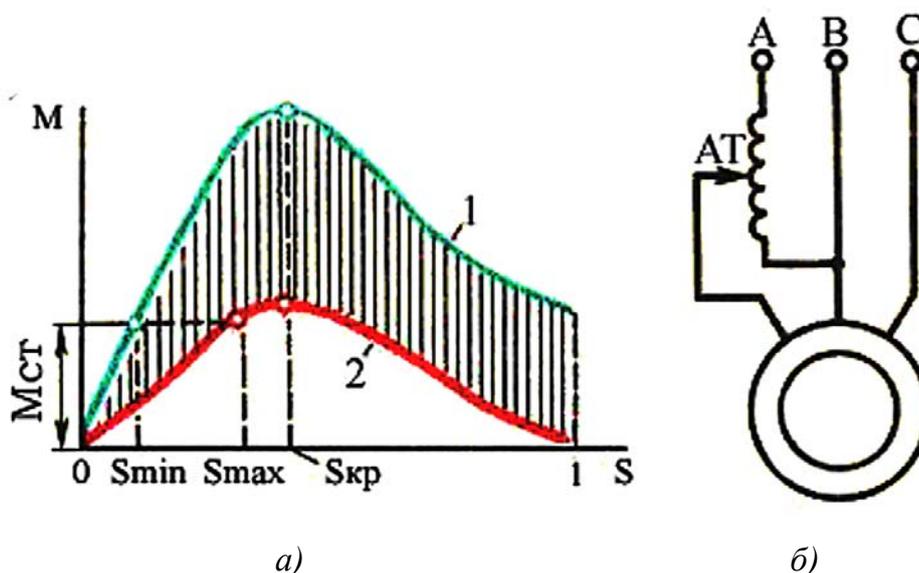


Рис. 48. Механические характеристики (а) и схема включения (б) асинхронного двигателя при регулировании частоты вращения изменением симметрии трехфазной системы

Для регулировки несимметрии подводимого напряжения можно в цепь одной из фаз включить однофазный регулировочный автотрансформатор (АТ) (рис. 48, б). При уменьшении напряжения на выходе АТ несимметрия увеличивается и частота вращения ротора уменьшается. Недостатками этого способа регулирования являются узкая зона регулирования и уменьшение КПД двигателя по мере увеличения несимметрии напряжения. Обычно этот способ регулирования частоты вращения применяют лишь в двигателях малой мощности.

Регулирование частоты вращения изменением активного сопротивления в цепи ротора. Этот способ регулирования частоты вращения возможен лишь в двигателях с фазным ротором. Механические характеристики асинхронного двигателя, построенные для различных значений активного сопротивления цепи ротора (см. рис. 35) показывают, что с увеличением активного сопротивления ротора возрастает скольжение, соответствующее заданному нагрузочному моменту. Частота вращения двигателя при этом уменьшается. Зависимость скольжения (частоты вращения) от активного сопротивления цепи ротора выражается формулой, полученной преобразованием:

$$s = \frac{m_1 I_2^2 r_2'}{\omega_1 M}$$

Практически изменение активного сопротивления цепи ротора достигается включением в цепь ротора регулировочного реостата (РР), подобного пусковому реостату (ПР) (см. рис. 40), но рассчитанного на длительный режим работы. Электрические потери в роторе пропорциональны скольжению ($P_{\text{э2}} = sP_{\text{эм}}$), поэтому уменьшение частоты вращения (увеличение скольжения) сопровождается ростом электрических потерь в цепи ротора и снижением КПД двигателя. Так, если при неизменном нагрузочном моменте на валу двигателя увеличить скольжение от 0,02 до 0,5, что соответствует уменьшению частоты вращения примерно вдвое, то потери в цепи ротора составят почти половину электромагнитной мощности двигателя. Это свидетельствует о неэкономичности рассматриваемого способа регулирования. К тому же необходимо иметь в виду, что рост потерь в роторе сопровождается ухудшением условий вентиляции из-за снижения частоты вращения, что приводит к перегреву двигателя.

Рассматриваемый способ регулирования имеет еще и тот недостаток, что участок механической характеристики, соответствующий устойчивой работе двигателя, при введении в цепь ротора добавочного сопротивления становится более пологим и колебания нагрузочного момента на валу двигателя сопровождаются значительными изменениями частоты вращения ротора. Это иллюстрирует рисунок 49, на котором видно, что если нагрузочный момент двигателя изменится на $M = M'_{\text{ст}} - M''_{\text{ст}}$, то изменение частоты вращения при выведенном регулировочном реостате ($r'_\delta = 0$) составит Δn_{2I} , а при введенном реостате — Δn_{2II} . В последнем случае изменение частоты вращения значительно больше.

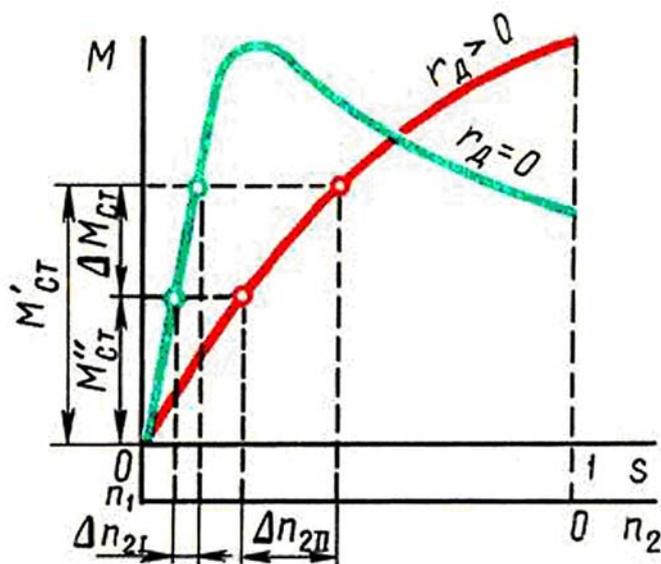


Рис. 49. Влияние сопротивления цепи ротора на колебания частоты вращения при изменении нагрузки

Но несмотря на указанные недостатки, рассмотренный способ регулирования частоты вращения широко применяется в асинхронных двигателях с фазным ротором. В зависимости от конструкции регулировочного реостата этот способ регулирования частоты вращения может быть плавным (при плавном изменении сопротивления РР) или ступенчатым (при ступенчатом изменении сопротивления РР).

Способ обеспечивает регулирование частоты вращения в широком диапазоне, но только вниз от синхронной частоты вращения. Вместе с тем он обеспечивает двигателю улучшенные пусковые свойства.

Регулирование частоты вращения изменением частоты тока в статоре. Этот способ регулирования (частотное регулирование) основан на изменении синхронной частоты вращения $n_1 = f_1 60/p$.

Для осуществления этого способа регулирования необходим источник питания двигателя переменным током с регулируемой частотой. В качестве таких источников могут применяться электромашинные, ионные или полупроводниковые преобразователи частоты (ПЧ). Чтобы регулировать частоту вращения, достаточно изменить частоту тока f_1 . Но с изменением частоты $f_1 = \omega_1 p / (2\pi)$ будет изменяться и максимальный момент. Поэтому для сохранения неизменными перегрузочной способности, коэффициента мощности и КПД двигателя на требуемом уровне необходимо одновременно с изменением частоты f_1 изменять и напряжение питания U_1 . Характер одновременного изменения f_1 и U_1 зависит от закона изменения момента нагрузки и определяется уравнением

$$\frac{U'_1}{U_1} = \frac{f'_1}{f_1} \sqrt{\frac{M'}{M}},$$

где U_1 и M — напряжение и момент при частоте f_1 ;

U'_1 и M' — напряжение и момент при частоте f'_1 .

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

$$U'_1 = \frac{U_1 f'_1}{f_1}.$$

При этом мощность двигателя увеличивается пропорционально нарастанию частоты вращения. Если же регулирование производится при условии постоянства мощности двигателя ($P_{эм} = M\omega_1 = \text{const}$), то подводимое напряжение следует изменить в соответствии с законом:

$$U'_1 = U_1 \sqrt{\frac{f'_1}{f_1}}.$$

Частотное регулирование двигателей позволяет плавно изменять частоту вращения в широком диапазоне (до 12:1). Однако источники питания с регулируемой частотой тока удорожают установку. Поэтому частотное регулирование до последнего времени применялось в основном для одновременного регулирования группы двигателей, работающих в одинаковых условиях (например, рольганговых двигателей). Но благодаря развитию силовой полупроводниковой техники в последние годы созданы устройства частотного регулирования асинхронными двигателями, технико-экономические показатели которых позволяют применять их для индивидуального регулирования асинхронными двигателями.

Использование асинхронных двигателей, укомплектованных такими устройствами для частотного регулирования, наиболее целесообразно в пожаро- и взрывоопасных средах (химическая и нефтеперерабатывающая промышленность), где применение коллекторных двигателей недопустимо.

Регулирование частоты вращения изменением числа полюсов обмотки статора. Этот способ регулирования частоты вращения дает ступенчатую регулировку. Так, при $f_1 = 50$ Гц и $p = 1 \div 5$ пар полюсов можно получить следующие синхронные частоты вращения: 3 000, 1 500, 1 000, 750, 600 об/мин.

Изменять число полюсов в обмотке статора можно либо укладкой на статоре двух обмоток с разным числом полюсов, либо укладкой на статоре одной обмотки, конструкция которой позволяет путем переключения катушечных групп получать различное число полюсов. Последний способ получил наибольшее применение.

Принцип преобразования четырехполюсной обмотки в двухполюсную (для одной фазы) показан на рисунке 50: при последовательном согласном соединении двух катушек возбуждаемое или магнитное поле образует четыре полюса (рис. 50, а); при последовательном встречном (рис. 50, б) или параллельном соединениях (рис. 50, в) два полюса. Таким образом, принцип образования полюсно переключаемой обмотки основан на том, что каждая фаза обмотки делится на части (катушечные группы), изменяя схему соединения которых получают разное число полюсов.

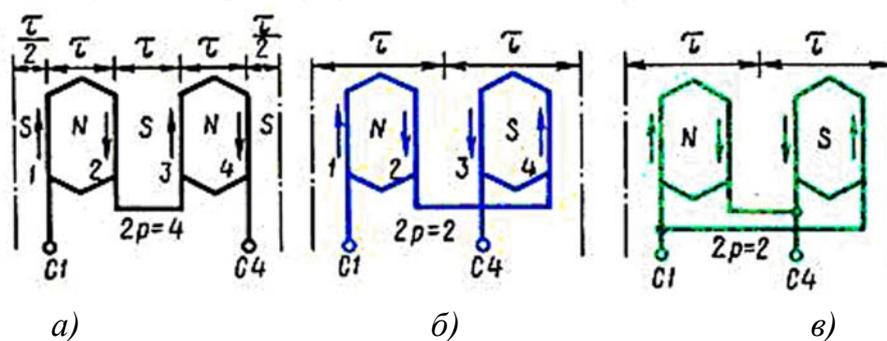


Рис. 50. Схемы включения обмотки статора на разное число полюсов

Возможны два режима работы асинхронных двигателей с полюсно переключаемыми обмотками:

Режим постоянного момента (рис. 51, а) — при переключении двигателя с одной частоты вращения на другую вращающий момент на валу двигателя M_2 остается неизменным, а мощность P_2 изменяется пропорционально частоте вращения n_2 :

$$P_2 = 0,105 M_2 n_2.$$

Режим постоянной мощности (рис. 51, б) — при переключении двигателя с одной частоты вращения на другую мощность P_2 остается примерно одинаковой, а момент на валу M_2 изменяется соответственно изменению частоты вращения n_2 :

$$M_2 = 9,55 \frac{P_2}{n_2}.$$

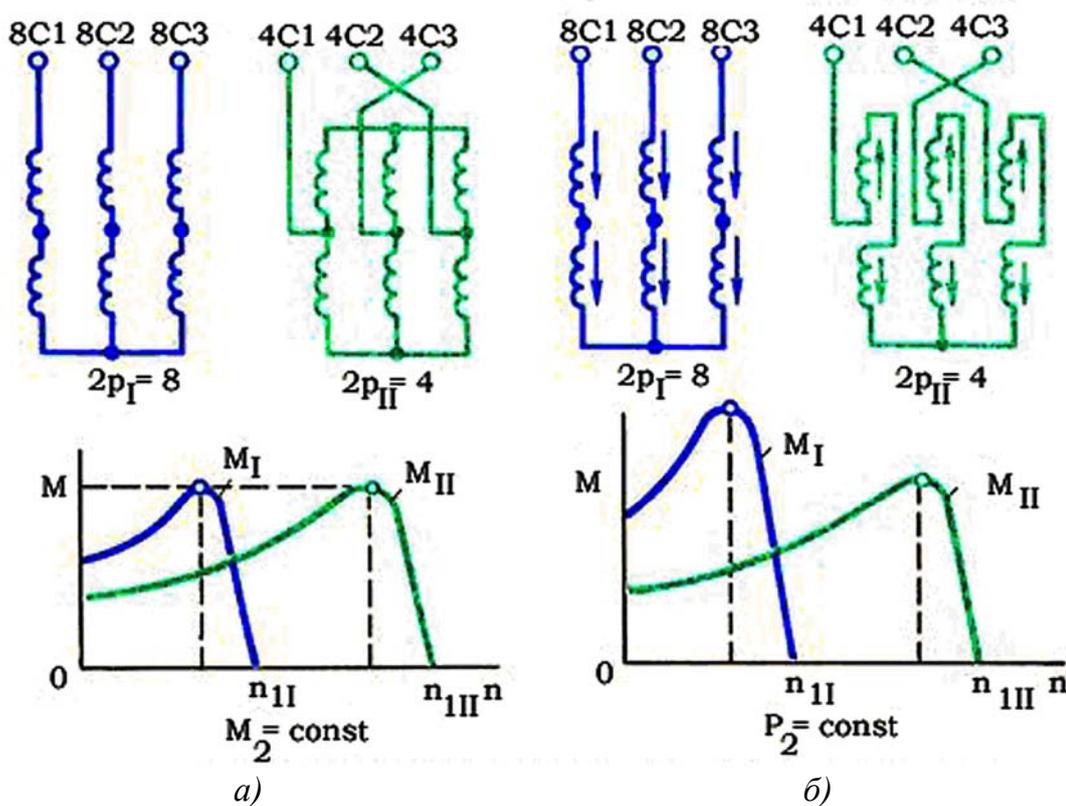


Рис. 51. Схемы переключения числа полюсов и механические характеристики в режимах постоянного момента (а) и постоянной скорости (б)

Если на статоре расположить две полюсно переключаемые обмотки, то получим четырехскоростной двигатель. Однако возможно применение и одной обмотки, допускающей путем переключения катушечных групп получение до четырех вариантов различных чисел полюсов. Например, асинхронный двигатель типа 4А180М12/8/6/4 имеет на статоре обмотку, допускающую переключение на 12, 8, 6, 4 полюса.

Регулирование частоты вращения изменением числа полюсов на статоре применяют исключительно в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором, так как число полюсов в обмотке этого ротора всегда равно числу полюсов статора и для изменения частоты вращения достаточно изменить число полюсов в обмотке статора. В случае же фазного ротора пришлось бы и на роторе применить полюсно переключаемую обмотку, что привело бы к недопустимому усложнению двигателя.

2.12. Принцип действия и пуск однофазного асинхронного двигателя

По своему устройству однофазный асинхронный двигатель аналогичен трехфазному и состоит из статора, в пазах которого уложена однофазная обмотка и короткозамкнутого ротора. Особенность работы однофазного асинхронного двигателя заключается в том, что при включении однофазной обмотки статора $C_1 - C_2$ в сеть (рис. 52) МДС статора создает не вращающийся, а пульсирующий магнитный поток с амплитудой Φ_{max} , изменяющейся от $+\Phi_{max}$ до $-\Phi_{max}$. При этом ось магнитного потока остается неподвижной в пространстве.

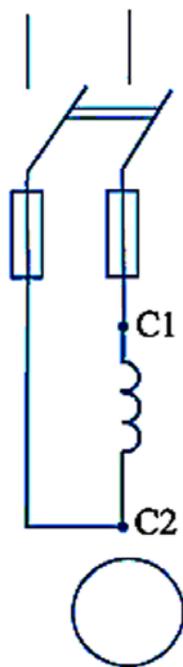


Рис. 52. Схема включения
однофазного асинхронного двигателя

Для объяснения принципа действия однофазного двигателя пульсирующий поток Φ_{max} разложим на два вращающихся в противоположные стороны потока Φ_{np} и Φ_{obr} (рис. 53), каждый из которых равен $0,5\Phi_{max}$ и вращается с частотой, об/мин:

$$n_{np} = n_{obr} = f_1 60/p = n_1.$$

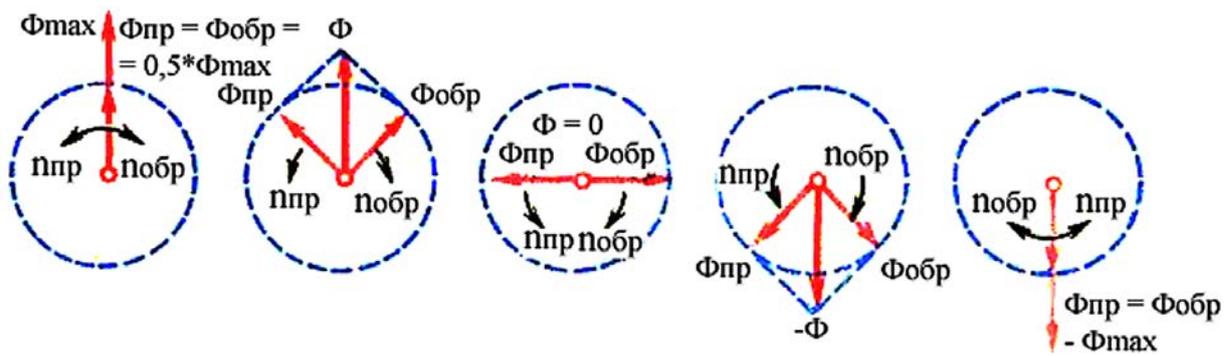


Рис. 53. Разложения пульсирующего магнитного потока на два вращающихся

Условимся считать поток $\Phi_{пр}$, вращающийся в направлении вращения ротора, прямым, а поток $\Phi_{обр}$ — обратным. Допустим, что ротор двигателя вращается против часовой стрелки, т.е. в направлении потока $\Phi_{пр}$.

Частота вращения ротора n_2 меньше частоты вращения магнитного поля статора n_1 поэтому скольжение ротора относительно вращающегося потока $\Phi_{пр}$ будет $s_{пр} = (n_1 - n_2)/n_1 = s$.

Обратный поток $\Phi_{обр}$ вращается противоположно ротору, поэтому частота вращения ротора n_2 относительно $\Phi_{обр}$ — отрицательная. В этом случае скольжение ротора относительно $\Phi_{обр}$ определится выражением:

$$s_{обр} = \frac{n_1 - (-n_2)}{n_1} = \frac{n_1 + n_2}{n_1} = \frac{n_1 + n_1 - n_1 + n_2}{n_1} = \frac{2n_1}{n_1} - \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 2 - s.$$

Прямое поле наводит в обмотке ротора ЭДС $E_{2пр}$, а обратное поле — ЭДС $E_{2обр}$. Эти ЭДС создают в обмотке ротора токи $I'_{2пр}$ и $I'_{2обр}$.

Известно, что частота тока в роторе пропорциональна скольжению ($f_2 = s f_1$). Так как $s_{пр} \leq s_{обр}$, то частота тока $I'_{2обр}$ намного больше частоты тока $I'_{2пр}$.

Так, для однофазного двигателя с $n_1 = 1500$ об/мин, $n_2 = 1500$ об/мин и $f_1 = 50$ Гц получим:

$$s_{пр} = (1500 - 1450)/1500 = 0,033; f_{2пр} = 0,033 \cdot 50 = 1,8 \text{ Гц};$$

$$s_{обр} = (1500 + 1450)/1500 = 1,96; f_{2обр} = 1,96 \cdot 50 = 98 \text{ Гц}.$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора току $I'_{2обр}$ во много раз больше ее активного сопротивления (потому что $f_{2обр} \geq f_{2пр}$). Ток $I'_{2обр}$ является почти чисто индуктивным, оказывающим сильное размагничивающее действие на обратное поле $\Phi_{обр}$. В результате обратное поле и обусловленный им момент $M_{обр}$ оказываются значительно ослабленными и ротор однофазного двигателя вращается в направлении прямого поля под действием момента $M = M_{пр} - M_{обр}$, где $M_{пр}$ — электромагнитный момент, обусловленный прямым полем.

На рисунке 54 представлен график зависимости вращающего момента M в функции скольжения $s = s_{np}$. Этот график получен путем наложения графиков $M_{np} = f(s_{np})$ и $M_{обр} = f(s_{обр})$. При малых значениях скольжения s , что соответствует работе двигателя в пределах номинальной нагрузки, вращающий момент M создается главным образом моментом M_{np} .

При $s_{np} - s_{обр} = 1$ моменты M_{np} и $M_{обр}$ равны, поэтому пусковой момент однофазного двигателя равен нулю. Следовательно, однофазный асинхронный двигатель не может самостоятельно прийти во вращение при подключении его к сети, а нуждается в первоначальном моменте, так как лишь при s не равен 1 на ротор двигателя действует вращающий момент $M = M_{np} - M_{обр}$.

Приведенные на рисунке 54 зависимости моментов показывают, что однофазный асинхронный двигатель не создает пускового момента. Чтобы этот момент появился, необходимо во время пуска двигателя создать в нем вращающееся магнитное поле. С этой целью на статоре двигателя помимо рабочей обмотки A , применяют еще одну обмотку — пусковую B . Эти обмотки располагают на статоре обычно так, чтобы их оси были смещены относительно друг друга на 90 эд. град. Кроме того, токи в обмотках статора I_a и I_b должны быть сдвинуты по фазе относительно друг друга. Для этого в цепь пусковой обмотки включают фазосмещающий элемент (ФЭ), в качестве которого могут быть применены активное сопротивление, индуктивность или емкость (рис. 55). По достижении частотой вращения значения, близкого к номинальному, пусковую обмотку B отключают с помощью реле. Таким образом, во время пуска двигатель является двухфазным, а во время работы — однофазным.

Для получения вращающегося магнитного поля посредством двух обмоток на статоре, смещенных относительно друг друга на 90 эл. град, необходимо соблюдать следующие условия (рис. 56):

- а) МДС рабочей и пусковой обмоток F_A и F_B должны быть равны и сдвинуты в пространстве относительно друг друга на 90 эл. град;
- б) токи в обмотках статора I_A и I_B должны быть сдвинуты по фазе относительно друг друга на 90°.

При строгом соблюдении указанных условий вращающееся поле статора является круговым, что соответствует наибольшему вращающему моменту. При частичном нарушении какого-либо из условий поле статора становится эллиптическим, содержащим обратную составляющую. Обратная составляющая поля создает тормозной момент и ухудшает пусковые свойства двигателя.

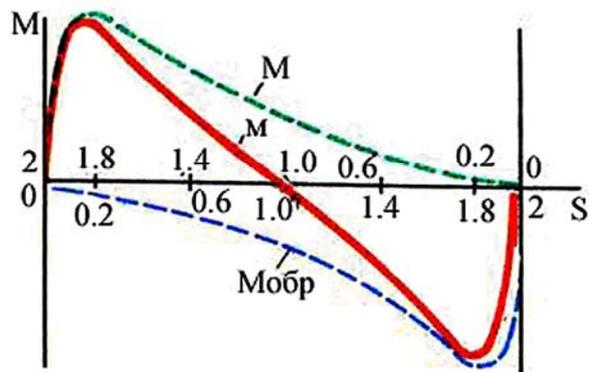


Рис. 54. Механические характеристики однофазного асинхронного двигателя

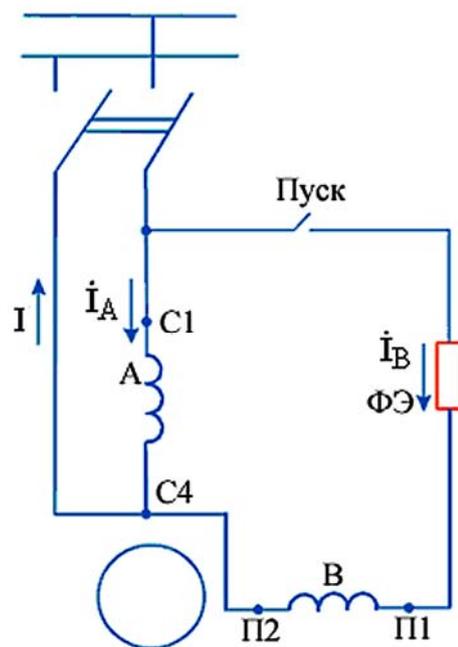


Рис. 55. Схема однофазного асинхронного двигателя с пусковой обмоткой

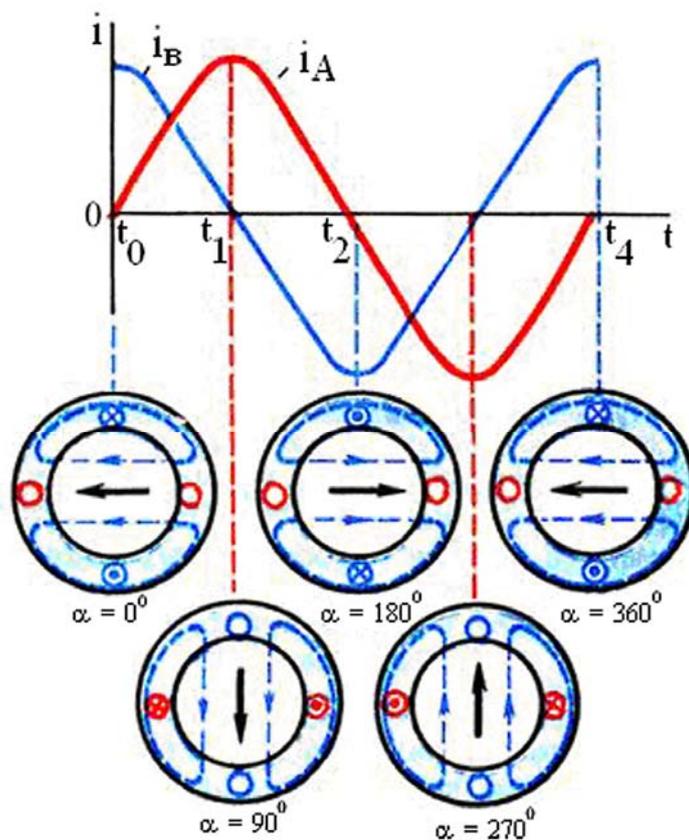


Рис. 56. Получение вращающегося магнитного поля двухфазной системой токов

Из векторных диаграмм, приведенных на рисунке 57, видно, что активное сопротивление и индуктивность в качестве ФЭ не обеспечивают получения фазового сдвига между токами в 90° . Лишь только емкость C в качестве ФЭ обеспечивает фазовый сдвиг на 90° . Значение этой емкости выбирают таким, чтобы ток пусковой обмотки I_B в момент пуска ($s = 1$) опережал по фазе напряжение U_1 на угол φ_B , дополняющий угол φ_A до 90° :

$$\Psi = \varphi_A + \varphi_B = 90^\circ.$$

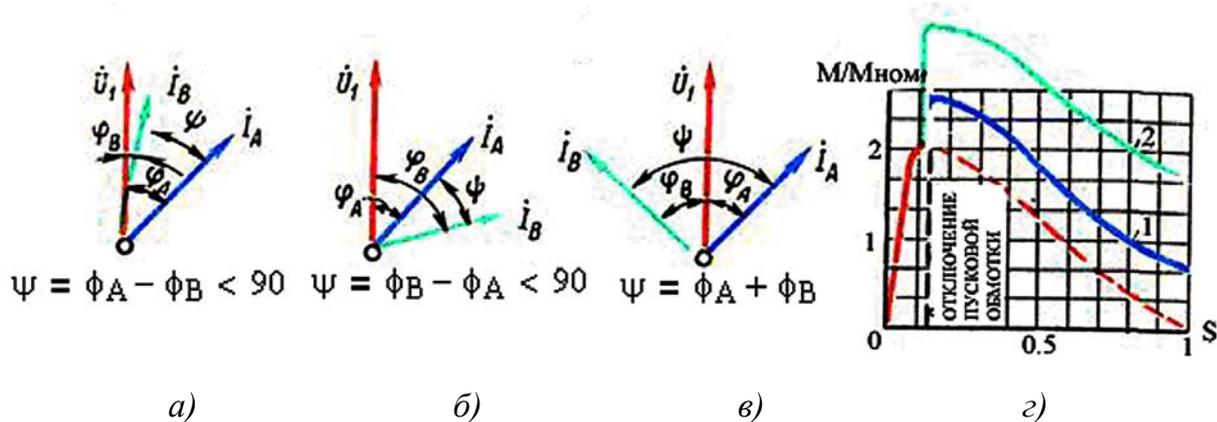


Рис. 57. Сравнение свойств фазосмещающих элементов:
 а — активное сопротивление; б — индуктивность; в — емкость;
 г — механические характеристики двигателя при различных фазосмещающих элементах: 1 — активное сопротивление; 2 — емкость

Если при этом обе обмотки создают одинаковые по значению МДС, то в начальный период пуска вращающееся поле окажется круговым и двигатель будет развивать значительный начальный пусковой момент. Однако применение емкости в качестве ФЭ часто ограничивается значительными габаритами конденсаторов, тем более что для получения кругового поля требуются конденсаторы значительной емкости. Например, для однофазного двигателя мощностью 200 Вт необходима емкость 30 мкФ при рабочем напряжении 300-500 В.

Получили распространение однофазные двигатели с активным сопротивлением в качестве ФЭ. При этом повышенное активное сопротивление пусковой обмотки достигается тем, что она выполняется проводом уменьшенного сечения (по сравнению с проводом рабочей обмотки). Так как эта обмотка включена на непродолжительное время (обычно несколько секунд), то такая ее конструкция вполне допустима. Пусковой момент таких двигателей обычно не превышает номинального, но это вполне приемлемо при пуске двигателей при небольшой нагрузке на валу.

Применение емкости в качестве ФЭ позволяет получить пусковой момент $M_n = (1,6 - 2,0)M_{ном}$. На рисунке 58, г приведены механические характеристики однофазного асинхронного двигателя при различных ФЭ. Для большей наглядности значения момента даны в относительных единицах.

2.11. Асинхронные конденсаторные двигатели

Асинхронный конденсаторный двигатель имеет на статоре две обмотки, занимающие одинаковое число пазов и сдвинутые в пространстве относительно друг друга на 90 эл. град. Одну из обмоток — главную — включают непосредственно в однофазную сеть, а другую — вспомогательную — включают в эту же сеть, но через рабочий конденсатор $C_{раб}$ (рис. 58, а).

В отличие от рассмотренного ранее однофазного асинхронного двигателя в конденсаторном двигателе, вспомогательная обмотка после пуска не отключается и остается включенной в течение всего периода работы, при этом емкость $C_{раб}$ создает фазовый сдвиг между токами I_A и I_B .

Таким образом, если однофазный асинхронный двигатель по окончании процесса пуска работает с пульсирующей МДС статора, то конденсаторный двигатель — с вращающейся. Поэтому конденсаторные двигатели по своим свойствам приближаются к трехфазным двигателям.

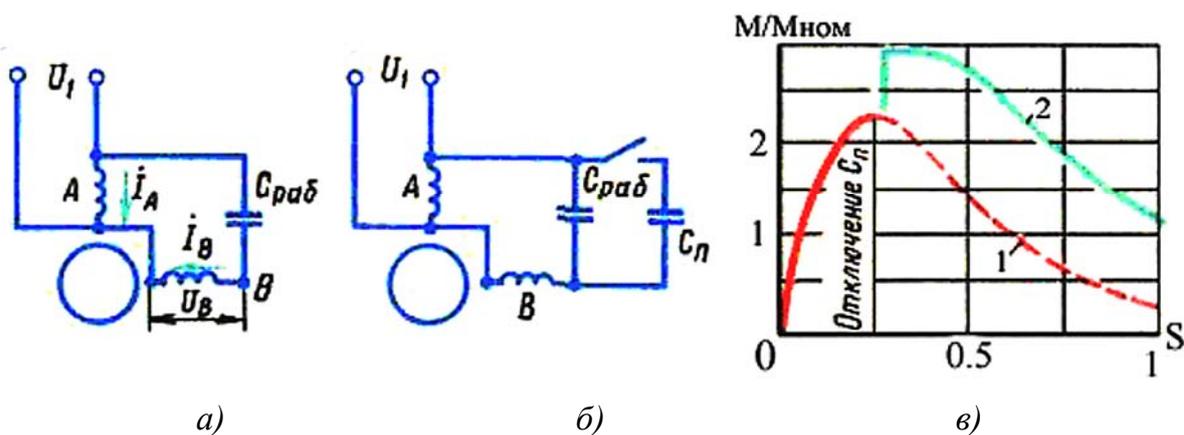


Рис. 58. Конденсаторный двигатель:
 а — с рабочей емкостью; б — с рабочей и пусковой емкостями;
 в — механические характеристики:
 1 — при рабочей емкости; 2 — при рабочей и пусковой емкостях

Необходимая для получения кругового вращающегося поля емкость $C_{раб}$, мкФ:

$$C_{раб} = \frac{1,6 \cdot 10^5 I_A \sin \varphi_A}{f_1 U_A R^2},$$

при этом отношение напряжений на главной U_A и на вспомогательной U_B обмотках должно быть

$$U_A = U_B = \operatorname{tg} \varphi_A \neq 1.$$

Анализ выражений показывает, что при заданных коэффициенте трансформации k и отношении напряжений U_A и U_B емкость $C_{раб}$ обеспечивает получение кругового вращающегося поля лишь при одном, вполне определенном режиме работы двигателя. Если же изменится режим (нагрузка), то изменятся и ток I_A и фазовый угол, а следовательно, и $C_{раб}$, соответствующая круговому полю. Таким образом, если нагрузка двигателя отличается от расчетной, то вращающееся поле двигателя становится эллиптическим и рабочие свойства двигателя ухудшаются. Обычно расчет $C_{раб}$ ведут для номинальной нагрузки или близкой к ней.

Обладая сравнительно высокими КПД и коэффициентом мощности ($\cos \varphi_1 = 0,80-0,95$), конденсаторные двигатели имеют неудовлетворительные пусковые свойства, так как емкость $C_{раб}$ обеспечивает круговое поле лишь при расчетной нагрузке, а при пуске двигателя поле статора эллиптическое. При этом пусковой момент обычно не превышает $0,5M_{ном}$.

Для повышения пускового момента параллельно емкости $C_{раб}$ включают емкость C_n , называемую пусковой (рис. 60). Величину C_n выбирают, исходя из условия получения кругового поля статора при пуске двигателя, т.е. получения наибольшего пускового момента. По окончании пуска емкость C_n следует отключить, так как при небольших скольжениях в цепи обмотки статора, содержащей емкость C и индуктивность L возможен резонанс напряжений, из-за чего напряжение на обмотке и на конденсаторе может в два-три раза превысить напряжение сети.

При выборе типа конденсатора следует помнить, что его рабочее напряжение определяется амплитудным значением синусоидального напряжения, приложенного к конденсатору U_c . При круговом вращающемся поле это напряжение превышает напряжение сети U_1 и определяется выражением

$$U_c = U_1 \sqrt{1 + R^2}.$$

Конденсаторные двигатели иногда называют двухфазными, так как обмотка статора этого двигателя содержит две фазы. Двухфазные двигатели могут работать и без конденсатора или другого ФЭ, если к фазам обмотки статора подвести двухфазную систему напряжений (два напряжения, одинаковые по значению и частоте, но сдвинутые по фазе относительно друг друга на 90°). Для получения двухфазной системы напряжений можно воспользоваться трехфазной линией с нулевым проводом, включив обмотки статора так, как показано на рисунке 59, а: одну обмотку — на линейное напряжение U_{AB} а другую на фазное напряжение U_C через автотрансформатор АТ (для выравнивания значения напряжений на фазных обмотках двигателя).

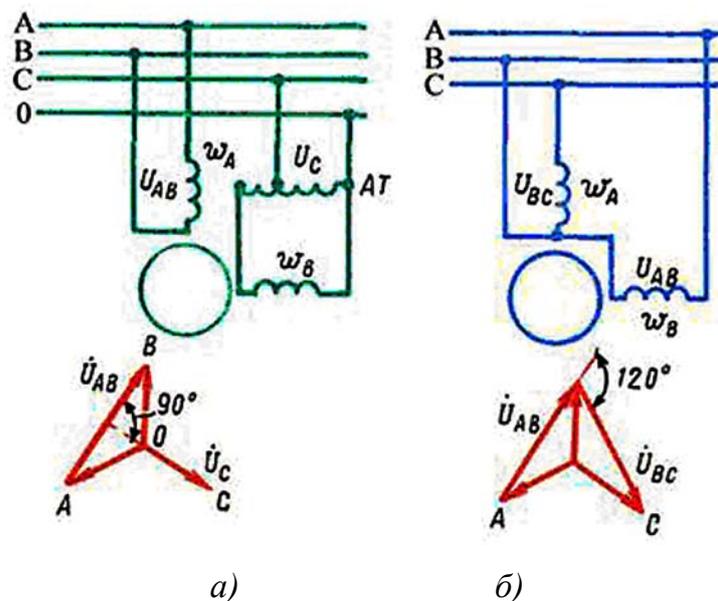


Рис. 59. Схемы включения двухфазного двигателя в трехфазную сеть

Возможно включение двигателя и без нулевого провода (рис. 59, б), но в этом случае напряжения на обмотках двигателя будут сдвинуты по фазе на 120° , что приведет к некоторому ухудшению рабочих свойств двигателя.

2.13. Работа трехфазного АД от однофазной сети

Трехфазный асинхронный двигатель может быть использован для работы от однофазной сети. В этом случае такой двигатель включают как конденсаторный по одной из схем рис. 60.

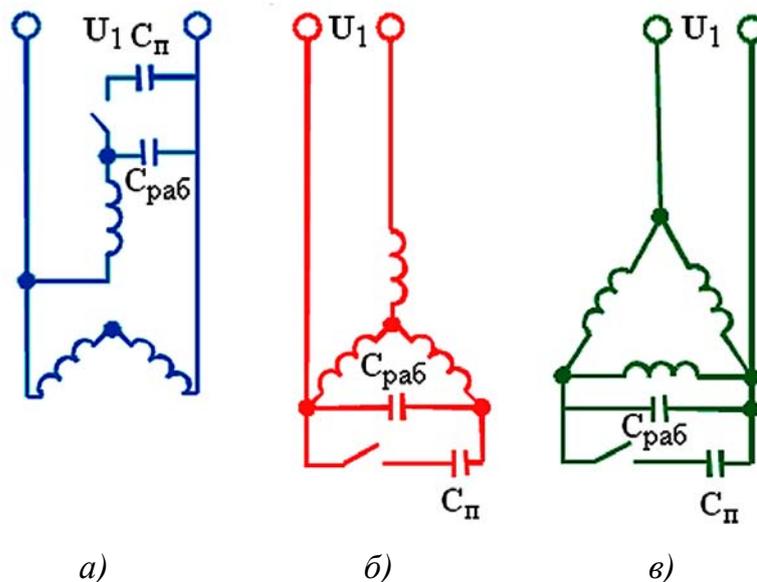


Рис. 60. Схемы соединения обмотки статора трехфазного асинхронного двигателя при включении его в однофазную сеть

Значение рабочей емкости $C_{раб}$, мкФ, при частоте переменного тока 50 Гц можно ориентировочно определить по одной из формул:

– для схемы, изображенной на рис. 60, а

$$C_{раб} = 2700 \frac{I_1}{U_C};$$

– для схемы, изображенной на рис. 60, б

$$C_{раб} = 2800 \frac{I_1}{U_C};$$

– для схемы, изображенной на рис. 60, в

$$C_{раб} = 4800 \frac{I_1}{U_C}.$$

Здесь I_1 — номинальный (фазный) ток в обмотке статора, А;
 U_C — напряжение однофазной сети, В.

При подборе рабочей емкости необходимо следить за тем, чтобы ток в фазных обмотках статора при установившемся режиме работы не превышал номинального значения.

Если пуск двигателя происходит при значительной нагрузке на валу, то параллельно рабочей емкости $C_{раб}$ следует включить пусковую емкость $C_n = (2,5 \div 3,0)C_{раб}$.

В этом случае пусковой момент становится равным номинальному. При необходимости дальнейшего увеличения пускового момента следует принять еще большее значение пусковой емкости ($C_n \leq 8C_{раб}$).

Большое значение для надежной работы асинхронного двигателя в качестве конденсаторного имеет правильный выбор конденсатора по напряжению. Следует иметь в виду, что габариты и стоимость конденсаторов определяются не только их емкостью, но и рабочим напряжением. Поэтому выбор конденсатора с большим «запасом» по напряжению ведет к неоправданному увеличению габаритов и стоимости установки, а включение конденсаторов на напряжение, превышающее допустимое рабочее напряжение, приводит к преждевременному выходу из строя конденсаторов, а следовательно, и всей установки.

При определении напряжения на конденсаторе при включении двигателя по одной из рассмотренных схем необходимо иметь в виду следующее: при включении двигателя по схеме рис. 60, а напряжение на конденсаторе равно $U_k = 1,3U_C$, а при включении двигателя по схемам рис. 60, б, в это напряжение равно $U_k = 1,15U_C$.

В схемах конденсаторных двигателей обычно применяют бумажные конденсаторы в металлическом герметичном корпусе прямоугольной формы типов КБГ — МН или БГТ (термостойкие). На корпусе конденсатора указаны емкость и рабочее напряжение, постоянного тока.

При включении такого конденсатора в сеть переменного тока следует уменьшить примерно в два раза допустимое рабочее напряжение. Например, если на конденсаторе указано напряжение 600 В, то рабочее напряжение переменного тока следует считать 300 В.

2.14. Индукционный регулятор напряжения и фазорегулятор

Индукционный регулятор напряжения (ИР) представляет собой асинхронную машину с фазным ротором, предназначенную для плавного регулирования напряжения. Рассмотрим работу трехфазного ИР, получившего преимущественное применение. Ротор ИР заторможен посредством червячной передачи, которая не только удерживает его в заданном положении, но и позволяет плавно поворачивать его относительно статора. Обмотки статора и ротора в ИР имеют автотрансформаторную связь (рис. 61, а), поэтому ИР иногда называют поворотным автотрансформатором.

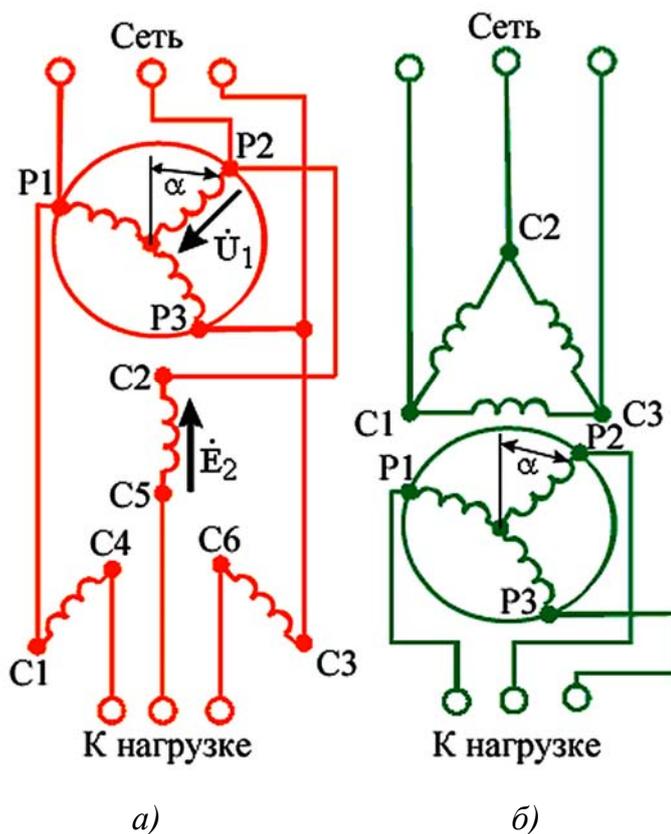


Рис. 61. Схемы соединения индукционного регулятора напряжения (а) и фазорегулятора (б)

Напряжение сети U_1 подводится к обмотке ротора, при этом ротор создает вращающееся магнитное поле, наводящее в обмотке ротора ЭДС $\dot{E}_1 = -\dot{U}_1$, а в обмотке статора — ЭДС \dot{E}_2 .

Фазовый сдвиг этих ЭДС относительно друг друга зависит от взаимного пространственного положения осей обмоток статора и ротора, определяемого углом α . При $\alpha = 0$ оси обмоток совпадают, вращающееся поле одновременно сцепляется с обеими обмотками и ЭДС \dot{E}_1 и \dot{E}_2 совпадают по фазе (при этом \dot{E}_2 и \dot{U}_1 находятся в противофазе). При $\alpha = 180$ эл. град ЭДС \dot{E}_1 и \dot{E}_2 окажутся в противофазе (\dot{E}_2 и \dot{U}_1 совпадают по фазе). Если пренебречь внутренними падениями напряжения, то напряжение на выходе ИР определяется геометрической суммой:

$$\dot{U}_2 = -\dot{U}_1 + \dot{E}_1.$$

При повороте ротора концы векторов \dot{E}_2 и \dot{U}_2 описывают окружность при этом \dot{U}_2 изменяется от $\dot{U}_{2\min} = \dot{U}_1 - \dot{E}_2$ при $\alpha = 0$ до $\dot{U}_{2\max} = \dot{U}_1 + \dot{E}_2$ при $\alpha = 180$ эл. град. Поворот ротора осуществляется либо вручную штурвалом, либо дистанционно включением исполнительного двигателя.

ИР применяются во всех случаях, где необходима плавная регулировка напряжения, например в лабораторных исследованиях.

Фазорегулятор (ФР). Предназначен для изменения фазы вторичного напряжения относительно первичного при неизменном вторичном напряжении. В отличие от ИР обмотки ротора и статора ФР электрически не соединены друг с другом, т.е. имеют трансформаторную связь (см. рис .61, б), поэтому ФР иногда называют *поворотным трансформатором*.

Изменение фазы вторичного напряжения осуществляется поворотом ротора относительно статора. Первичной обмоткой в ФР обычно является обмотка статора. Фазорегуляторы применяются в устройствах автоматики (для фазового управления) и измерительной технике (для проверки ваттметров и счетчиков).

2.15. Асинхронный преобразователь частоты

Как известно, частота тока в роторе асинхронной машины зависит от скольжения ($f_2 = sf_1$). Это свойство асинхронных машин используется в асинхронных преобразователях частоты (АПЧ).

Обмотку статора АПЧ подключают к трехфазной сети с частотой f_1 , а ротор приводят во вращение приводным двигателем (ПД) в направлении против вращения поля статора (рис. 62).

В этом случае в обмотке ротора наводится ЭДС E_2 частотой $f_2 > f_1$, так как скольжение $s > 1$. Указанная ЭДС через контактные кольца и щетки создает на выходе АПЧ напряжение. Если требуется получить на выходе АПЧ напряжение частотой $f_2 < f_1$, то ротор вращают в направлении вращения поля статора с частотой вращения $n_2 < n_1$ (при этом $s < 1$).

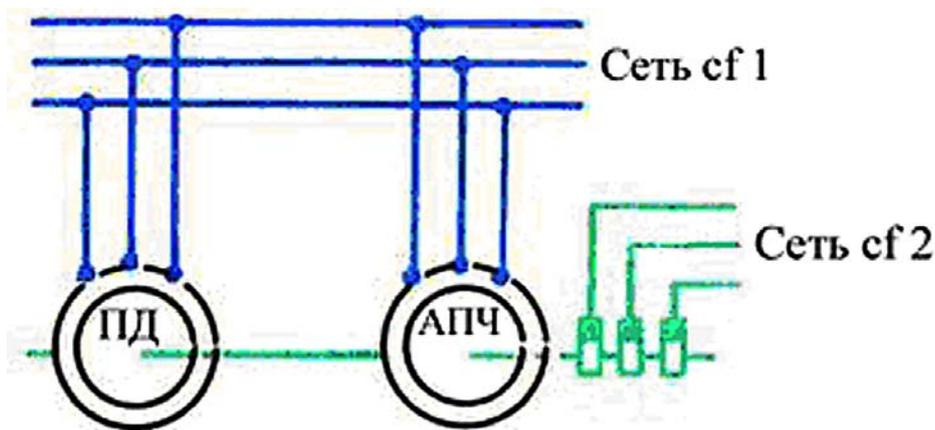


Рис. 62. Схема включения асинхронного преобразователя частоты

Мощность на выходе АПЧ складывается из электромагнитной мощности $P_{эм}$, передаваемой в обмотку ротора вращающимся полем статора, и механической мощности приводного двигателя $P_{пд}$, т.е.

$$P_2 = P_{эм} + P_{пд}.$$

Соотношение между мощностями $P_{эм}$ и $P_{пд}$ зависит от скольжения. Так, при работе АПЧ со скольжением $s = 2$ эти мощности равны и ротор половину мощности получает от статора, а половину — от приводного двигателя. При необходимости плавной регулировки частоты на выходе АПЧ в качестве приводного двигателя применяют электродвигатель с плавной регулировкой частоты вращения, например двигатель постоянного тока. Однако чаще всего АПЧ используют для получения определенной частоты тока f_2 и в качестве приводного применяют асинхронный или синхронный двигатель.

2.16. Линейные асинхронные двигатели

Подвижная часть линейного двигателя совершает поступательное движение, поэтому применение этих двигателей для привода рабочих машин с поступательным движением рабочего органа позволяет упростить кинематику механизмов, уменьшить потери в передачах и повысить надежность механизма в целом.

Возможны линейные двигатели четырех видов: электромагнитные (соленоидные), магнитоэлектрические (с применением постоянного магнита), электродинамические и асинхронные. Асинхронные (индукционные) линейные двигатели благодаря простоте конструкции и высокой надежности получили наибольшее применение.

Для объяснения принципа работы линейного асинхронного двигателя обратимся к асинхронному двигателю с вращательным движением ротора. Если статор этого двигателя (рис. 63, а) мысленно «разрезать» и «развернуть» так, чтобы он образовал дугу с углом α (рис. 63, б), то диаметр ротора увеличится. При этом мы получим асинхронный двигатель с дуговым статором. Частота вращения (об/мин) магнитного поля статора этого двигателя (синхронная частота)

$$n_1 = n_1^0 \alpha / (2\pi),$$

где n_1^0 — синхронная частота вращения обычного (до «разрезания») асинхронного двигателя, об/мин;

α — угол дуги статора, рад.

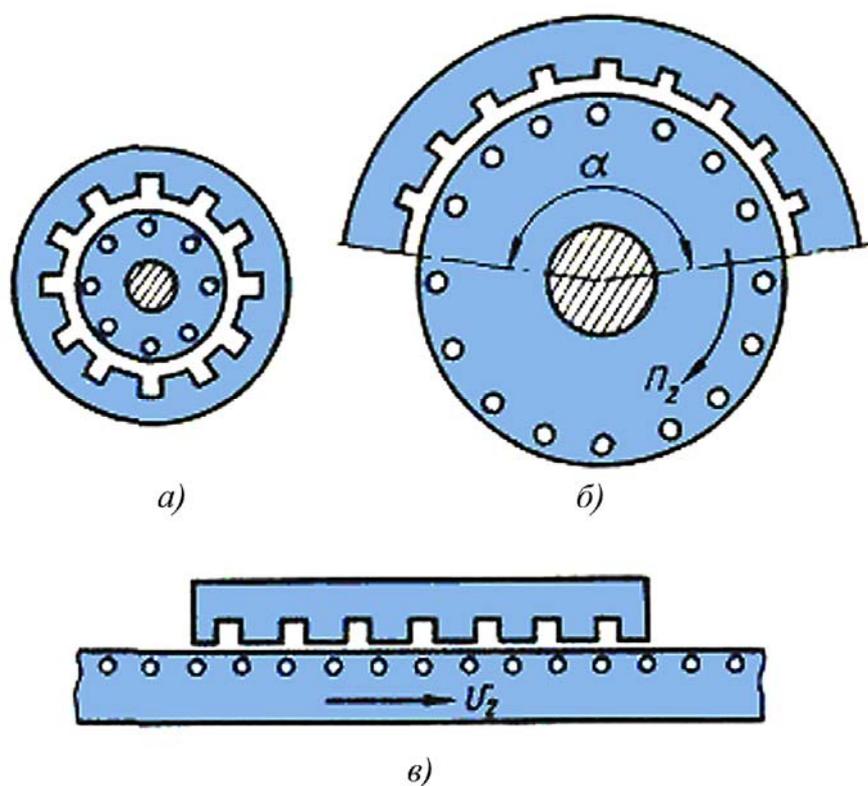


Рис. 63. К понятиям о дуговом и линейных двигателях

Из этого выражения следует, что, изменяя угол α , можно получить дуговой асинхронный двигатель на любую синхронную частоту меньше частоты вращения n_1^0 . Дуговые двигатели применяют для безредукторного привода устройств, требующих не больших частот вращения, исключив применение сложного и трудоемкого редуктора.

Если же «разрезанный» статор развернуть в плоскость, то получим асинхронный линейный двигатель (рис. 63, в).

Принципиальное конструктивное отличие линейного асинхронного двигателя от асинхронно двигателя с вращательным движением ротора состоит в том, что первичный элемент линейного двигателя (индуктор) создает не вращающееся, а бегущее магнитное поле и подвижная часть двигателя с короткозамкнутой обмоткой (или без нее), называемая *вторичным элементом*, перемещается вдоль своей оси. Скорость бегущего поля в линейном двигателе, м/с

$$v_1 = 2 \tau f_1 = f_1 L_c / p,$$

где τ — полюсное деление;

f_1 — частота тока в обмотке статора, Гц;

L_c — длина статора (индуктора), м.

Принцип действия линейного асинхронного двигателя основан на том, что бегущее поле индуктора, сцепляясь с короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента двигателя, наводит в ней ЭДС. Возникающие в стержнях этой обмотки токи взаимодействуют с бегущим полем индуктора и создают на индукторе и вторичном элементе электромагнитные силы, стремящиеся линейно переместить подвижную часть двигателя относительно неподвижной. В некоторых конструкциях линейных двигателей подвижной частью является индуктор, а в некоторых — вторичный элемент, называемый в этом случае *бегунком*. Если вторичный элемент линейного двигателя невозможно изготовить с короткозамкнутой обмоткой, то применяют вторичные элементы в виде полосы из меди, алюминия или ферромагнитной стали. Наиболее удовлетворительными получаются характеристики линейного двигателя при составном вторичном элементе, например выполненном в виде полосы из ферромагнитной стали, покрытой слоем меди.

Основной недостаток асинхронных двигателей с разомкнутым статором — дуговых и линейных — явление *краевого эффекта*, представляющего собой комплекс электромагнитных процессов, обусловленных разомкнутой конструкцией статора. К нежелательным последствиям краевого эффекта в первую очередь следует отнести появление «паразитных» тормозных усилий, направленных против движения подвижной части двигателя, и возникновение поперечных сил, стремящихся сместить подвижную часть двигателя в поперечном направлении. Кроме того, краевой эффект вызывает ряд других нежелательных явлений, ухудшающих рабочие характеристики линейных двигателей.

Линейные асинхронные двигатели применяют для привода заслонок, ленточных конвейеров, подъемно-транспортных механизмов. На рисунке 64 показано устройство линейного асинхронного двигателя привода тележки подъемного крана.

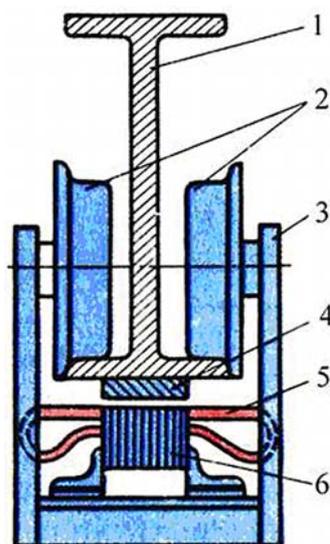


Рис. 64. Линейный асинхронный двигатель привода тележки подъемного крана

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. Бегущее магнитное поле индуктора наводит в стальной полосе 4 вихревые токи. Электромагнитные силы, возникающие в результате взаимодействия этих токов с магнитным полем индуктора, перемещают индуктор (тележку) вдоль стальной полосы 4.

Линейные асинхронные двигатели значительной мощности применяют на транспорте в качестве тяговых двигателей. Один из вариантов такого двигателя показан на рисунке 65.

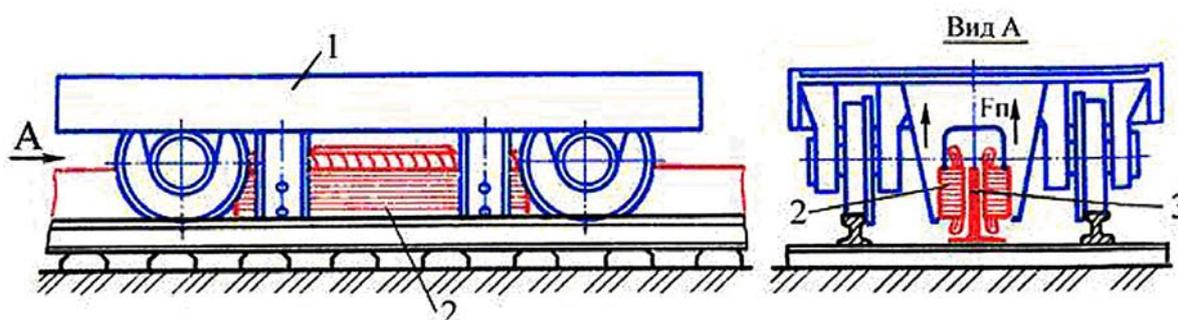


Рис. 65. Линейный асинхронный двигатель привода железнодорожного транспортного средства

Здесь индуктор 2 двигателя подвешен к транспортному средству 1, а стальная полоса 3 установлена вертикально на основании пути между рельсами. В этой конструкции поперечная сила F_n , вызванная краевым эффектом, используется полезно, так как она уменьшает силу давления на несущие оси и колеса и, как следствие, уменьшает трение качения.

2.17. Однослойные обмотки статора

Трехфазная обмотка. В однослойных обмотках каждая сторона катушки полностью заполняет паз сердечника статора. При этом число катушечных групп в каждой фазе равно числу пар полюсов, так что общее число катушечных групп в однослойной обмотке равно pm_1 .

Однослойные обмотки статоров разделяют на концентрические и шаблонные. В концентрической обмотке катушки каждой катушечной группы имеют разную ширину и располагаются концентрически. Шаги обмотки у катушек, входящих в катушечную группу, неодинаковы, но их среднее значение $y_{1cp} = Z_1/(2p)$.

Так, для трехфазной однослойной концентрической обмотки с $Z_1 = 24$; $2p = 4$ имеем $y_{1cp} = 24/4 = 6$ пазов; $q_1 = Z_1/(2pm_1) = 24/(4 \cdot 3) = 2$. Следовательно, катушечная группа каждой фазной обмотки состоит из двух расположенных концентрически катушек. Шаги этих катушек: $y_{11} = 7$ и $y_{12} = 5$. Развернутая схема этой обмотки ($2p = 4$; $Z_1 = 24$; $q_1 = 2$; $y_{1cp} = 6$) представлена на рисунке 66, а.

Рассмотренную однослойную обмотку называют *двухплоскостной*, так как лобовые части катушек этой обмотки имеют разный вылет и располагаются в двух плоскостях (рис. 66, б). Такая конструкция обмотки позволяет избежать пересечения лобовых частей катушек, принадлежащих разным фазам. При нечетном числе пар полюсов число групп лобовых частей будет также нечетным. В этом случае одну катушечную группу приходится делать переходного размера с двоякоизогнутой лобовой частью.

Применение различных по размеру катушек, образующих катушечные группы, ведет к тому, что катушечные группы концентрических обмоток имеют разные электрические сопротивления. Это следует учитывать при определении размеров катушек катушечных групп, образующих фазную обмотку. Необходимо, чтобы все фазные обмотки имели одинаковое сопротивление, для чего они должны содержать одинаковое число различных по размерам катушечных групп. Основное достоинство однослойных концентрических обмоток — возможность применения станочной укладки. Этим объясняется широкое применение этого типа обмотки статора в асинхронных двигателях мощностью до 18 кВт, производство которых обычно имеет массовый характер.

Недостаток концентрических обмоток — наличие катушек различных размеров, что несколько усложняет ручное изготовление обмотки. Этот недостаток отсутствует в шаблонных однослойных обмотках, так как их катушки имеют одинаковые размеры и могут изготавливаться на общем шаблоне. Кроме того, все катушки таких обмоток имеют одинаковые сопротивления, а лобовые части получаются короче, чем в концентрических обмотках, что уменьшает расход меди.

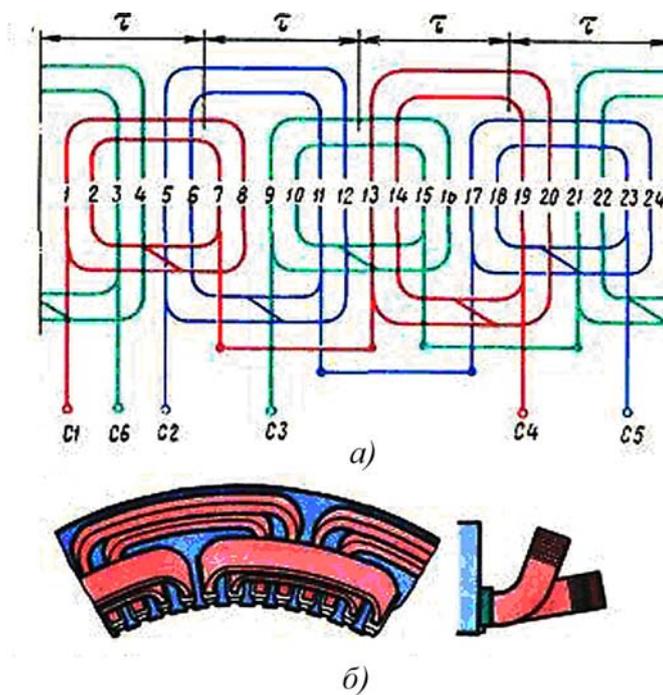


Рис. 66. Трехфазная однослойная обмотка статора с расположением лобовых частей в двух плоскостях:
a — развернутая схема;
б — расположение лобовых частей

В качестве примера рассмотрим шаблонную обмотку (рис. 67. *a*) двухполюсной машины с тремя катушками в катушечной группе. Трапецеидальная форма секций облегчает расположение лобовых частей обмотки (рис. 67. *б*).

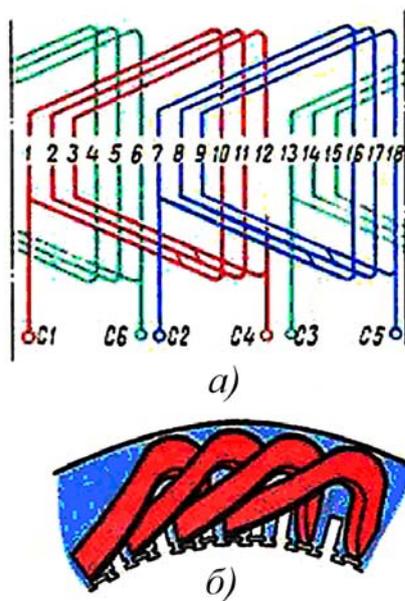


Рис. 67. Трехфазная однослойная шаблонная обмотка статора:
a — развернутая схема; *б* — общий вид

Основным недостатком всех типов однослойных обмоток является невозможность применения в них катушек с укороченным шагом, что необходимо для улучшения рабочих свойств машин переменного тока.

Однофазная обмотка. Эту обмотку статора выполняют аналогично одной фазе трехфазной обмотки, с той лишь разницей, что катушки этой обмотки занимают $2/3$ пазов сердечника статора. Такая конструкция обмотки делает ее наиболее экономичной, так как заполнение оставшихся $1/3$ пазов статора увеличило бы расход меди на изготовление обмотки в 1,5 раза, т.е. на 50%, а ЭДС обмотки возросла бы лишь на 15%.

Для однофазной обмотки ($m_1 = 1$), занимающей $2/3$ пазов на статоре, формула коэффициента распределения имеет вид

$$k_{pv} = \frac{\sin(60^\circ v)}{q_1 \sin(60^\circ v / q_1)}.$$

Для третьей гармоники ЭДС ($v = 3$) числитель выражения $\sin 60^\circ v = \sin 180^\circ = 0$.

Из этого следует, что в однофазной обмотке, занимающей $2/3$ пазов на статоре отсутствует третья гармоника ЭДС. На рисунке 68 показана схема однофазной однослойной обмотки. Однофазные обмотки могут быть и двухслойными.

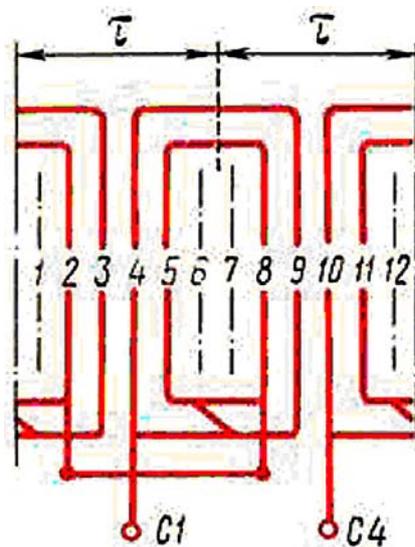


Рис. 68. Однофазная однослойная обмотка статора:
 $2p = 2$; $Z_1 = 12$; $q_1 = 4$

Контрольные вопросы к разделу 2

1. Что такое скольжение асинхронной машины?
2. Каков диапазон изменения скольжения асинхронной машины в различных режимах ее работы?
3. С какой целью обмотку статора асинхронного генератора подключают к сети трехфазного тока?
4. Каким образом асинхронный двигатель можно перевести в режим электромагнитного торможения?
5. Объясните конструкцию короткозамкнутого и фазного роторов.
6. Трехфазный двигатель предназначен для работы при напряжениях сети 220/380 В. Как следует соединить обмотку статора этого двигателя при напряжении сети 220 В и как — при напряжении 380 В?
7. Объясните принцип действия генератора переменного тока.
8. Чем определяется форма графика ЭДС синхронного генератора?
9. Каково назначение контактных колец и щеток в синхронном генераторе?
10. Каков принцип действия асинхронного двигателя?
11. Может ли ротор асинхронного двигателя вращаться синхронно с вращающимся полем?
12. Какие функции выполняет обмотка статора в синхронном генераторе и в асинхронном двигателе?
13. Какими показателями характеризуются пусковые свойства асинхронных двигателей?
14. Каковы достоинства и недостатки пусковых свойств асинхронных двигателей?
15. Как лучше с точки зрения улучшения пусковых свойств уменьшить пусковой ток: снижением подводимого к двигателю напряжения или увеличением активного сопротивления в цепи обмотки ротора?
16. Каковы достоинства и недостатки пуска асинхронных двигателей непосредственным включением в сеть?
17. Какие существуют способы пуска асинхронных двигателей при пониженном напряжении?
18. В чем суть эффекта вытеснения тока и почему он возникает при пуске двигателя и почти исчезает при его работе?
19. Почему бутылочная форма паза ротора способствует лучшему проявлению эффекта вытеснения тока?
20. Перечислите способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей и дайте им сравнительную оценку?
21. Почему при частотном регулировании частоты вращения одновременно с частотой тока необходимо изменить напряжение?

22. В чем различие между схемами соединения индукционного регулятора напряжения и фазорегулятора?
23. Сколько раз напряжение на выходе ИР достигает наибольшего значения за один оборот ротора, если обмотка имеет $2p = 6$?
24. Объясните работу сельсинов в индикаторной системе передачи. Чем вызвана ошибка в воспроизведении угла поворота?
25. Чем обеспечивается отсутствие самохода в асинхронном исполнительном двигателе?
26. Объясните принцип работы асинхронного линейного двигателя.
27. Как изменится ЭДС обмотки с $2p = 6$, если последовательное соединение ее катушечных групп изменить на параллельное? Начертите схемы для этих соединений.
28. Почему лобовые части однослойных концентрических обмоток располагаются в нескольких плоскостях?
29. Каковы достоинства и недостатки двухслойных и однослойных обмоток?
30. Почему однофазную рабочую обмотку статора укладывают в $2/3$ пазов?
31. Какой двигатель называется асинхронным?
32. Каковы устройство и принцип действия трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?
33. Каковы устройство и принцип действия трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором?
34. По какой формуле определяется частота вращения магнитного поля статора асинхронной машины.
35. Какой режим асинхронной машины называется двигательным?
36. Как рассчитывается величина полюсного деления?
37. Что называется скольжением и как оно определяется?
38. По какой формуле определяется электромагнитный момент асинхронного двигателя?
39. В каком случае применяется реостатный пуск асинхронного двигателя?
40. Какой режим асинхронной машины называется генераторным?
41. Частота вращения магнитного поля статора асинхронного двигателя — 3 000 об/мин, а частота вращения ротора — 2 940 об/мин. Чему будет равно скольжение?
42. По какой формуле определяются электрические потери в обмотке статора?
43. По какой схеме необходимо соединить обмотки статора асинхронного двигателя, если он включается в сеть с линейным напряжением 380 В, а в паспорте его указано: 380/220 В, Y/Δ?

44. Какой способ регулирования частоты вращения применяется для двигателей с фазным ротором?
45. Как изменится ток в обмотке ротора при увеличении нагрузки на валу?
46. Какая обмотка называется однослойной?
47. Для преобразования какой энергии предназначены асинхронные двигатели?
48. По какой формуле определяется число пазов на полюс и фазу?
49. Как маркируются выводы обмотки статора асинхронного двигателя?
50. Каковы достоинства и недостатки многоскоростных асинхронных двигателей?
51. Как можно плавно регулировать в широких пределах частоту вращения трехфазного асинхронного двигателя?
52. Что представляет собой механическая характеристика трехфазного асинхронного двигателя и каковы ее основные точки?
53. Что представляют собой рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя?
54. Как зависит ЭДС ротора асинхронного двигателя от скольжения?

3. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

3.1. Назначение и области применения синхронных машин

Синхронные машины — это бесколлекторные машины переменного тока. По своему устройству они отличаются от асинхронных машин лишь конструкцией ротора, который может быть явнополюсным или неявнополюсным. Что касается свойств, то синхронные машины отличаются синхронной частотой вращения ротора ($n_2 = n_1 = \text{const}$) при любой нагрузке, а также возможностью регулирования коэффициента мощности, устанавливая такое его значение, при котором работа синхронной машины становится наиболее экономичной. Синхронные машины обратимы и могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Синхронные генераторы (рис. 69) составляют основу электротехнического оборудования электростанций, т.е. практически вся электроэнергия вырабатывается синхронными генераторами.

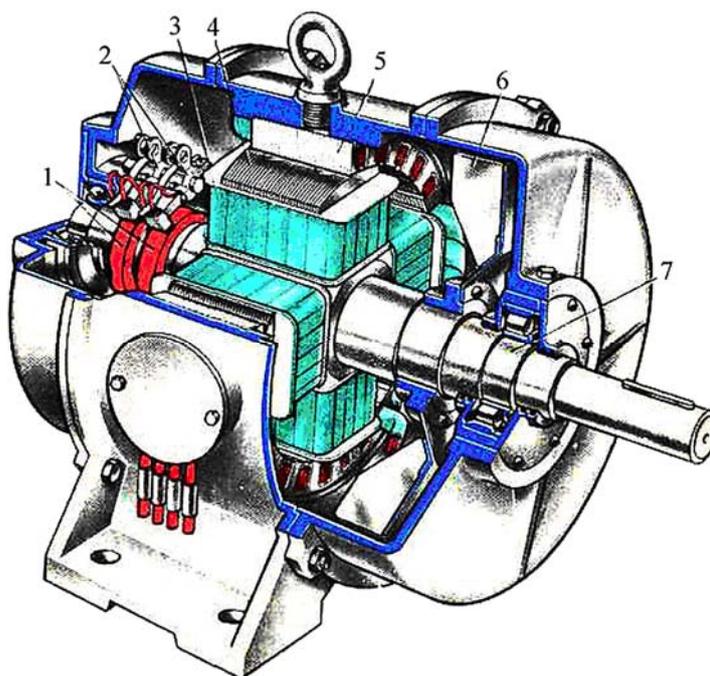


Рис. 69. Синхронный генератор (дизель-генератор):
1 — контактные кольца; 2 — щеткодержатели;
3 — полюсная катушка ротора; 4 — полюсный наконечник;
5 — сердечник статора; 6 — вентилятор; 7 — вал

Единичная мощность современных синхронных генераторов достигает миллиона киловатт и более. Синхронные двигатели применяются главным образом для привода устройств большой мощности. Такие двигатели по своим технико-экономическим показателям превосходят двигатели других типов. В крупных электроэнергетических установках синхронные машины иногда используются в качестве компенсаторов — генераторов реактивной

мощности, позволяющих повысить коэффициент мощности всей установки. В данном разделе рассмотрены главным образом трехфазные синхронные машины. Приведены также сведения по некоторым типам синхронных двигателей весьма малой мощности, применяемым в устройствах автоматики и приборной техники.

3.2. Принцип действия синхронного генератора

Для изучения принципа действия синхронного генератора воспользуемся упрощенной моделью синхронной машины (рис. 70).

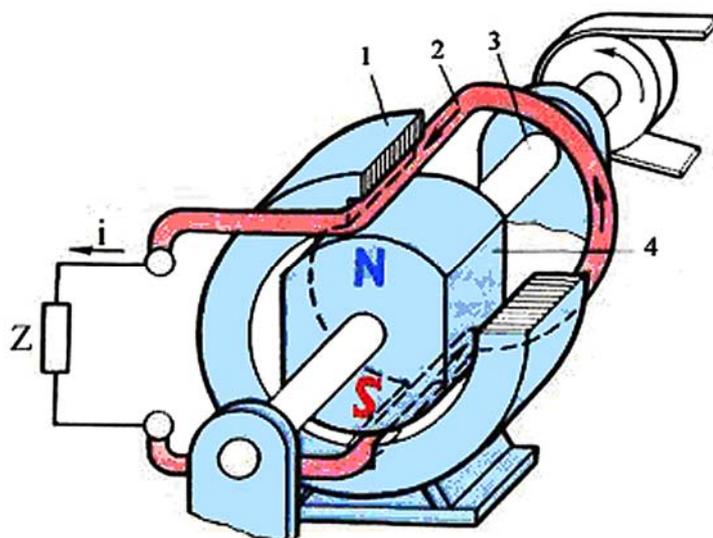


Рис. 70. Упрощенная модель синхронного генератора

Неподвижная часть машины, называемая *статором*, представляет собой полый шихтованный цилиндр 1 (сердечник статора) с двумя продольными пазами на внутренней поверхности. В этих пазах расположены стороны витка 2, являющегося *обмоткой статора*. Во внутренней полости сердечника статора расположена вращающаяся часть машины — *ротор*, представляющий собой постоянный магнит 4 с полюсами *N* и *S*, закрепленный на валу 3. Вал ротора посредством ременной передачи механически связан с приводным двигателем (на рисунке не показан). В реальном синхронном генераторе в качестве приводного двигателя может быть использован двигатель внутреннего сгорания либо турбина. Под действием вращающего момента приводного двигателя ротор генератора вращается с частотой n_1 против часовой стрелки. При этом в обмотке статора в соответствии с явлением электромагнитной индукции наводится ЭДС, направление которой показано на рисунке стрелками. Так как обмотка статора замкнута на нагрузку *Z*, то в цепи этой обмотки появится ток *i*.

В процессе вращения ротора магнитное поле постоянного магнита также вращается с частотой n_1 , поэтому каждый из проводников обмотки статора попеременно оказывается то в зоне северного (N) магнитного полюса, то в зоне южного (S) магнитного полюса. При этом каждая смена полюсов сопровождается изменением направления ЭДС в обмотке статора. Таким образом, в обмотке статора синхронного генератора наводится переменная ЭДС, а поэтому ток i в этой обмотке и в нагрузке Z также переменный.

Мгновенное значение ЭДС обмотки статора в рассматриваемом синхронном генераторе

$$e = B_{\delta} 2lv = B_{\delta} 2\pi D_1 n_1 / 60,$$

где B_{δ} — магнитная индукция в воздушном зазоре между сердечником статора и полюсами ротора, Тл;

l — активная длина одной пазовой стороны обмотки статора, м;

v — скорость движения полюсов ротора относительно статора, м/с:

$$v = \pi D_1 n_1 / 60;$$

D_1 — внутренний диаметр сердечника статора, м.

Эта формула показывает, что при неизменной частоте вращения ротора форма кривой переменной ЭДС обмотки якоря определяется исключительно законом распределения магнитной индукции B_{δ} в зазоре. Если бы график магнитной индукции в зазоре представлял собой синусоиду ($B_{\delta} = B_{\max} \sin \alpha$), то ЭДС генератора была бы *синусоидальной*. Однако получить синусоидальное распределение индукции в зазоре практически невозможно. Так, если воздушный зазор δ постоянен (рис. 71), то магнитная индукция B_{δ} в воздушном зазоре распределяется по трапецеидальному закону (кривая 1), а следовательно, и график ЭДС генератора представляет собой трапецеидальную кривую.

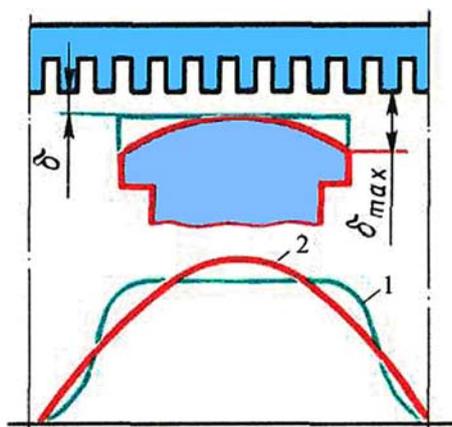


Рис. 71. Графики распределения магнитной индукции в воздушном зазоре синхронного генератора

Если края полюсов скосить так, чтобы зазор на краях полюсных наконечников был равен δ_{\max} (как это показано красной линией на рис. 71), то график распределения магнитной индукции в зазоре приблизится к синусоиде (кривая 2), а следовательно, и график ЭДС генератора приблизится к синусоиде.

Частота ЭДС синхронного генератора f_1 , Гц, прямо пропорциональна частоте вращения ротора n_1 , об/мин, которую принято называть синхронной частотой вращения:

$$f_1 = pn_1/60,$$

здесь p — число пар полюсов; в рассматриваемом генераторе два полюса, т.е. $p = 1$.

Для получения промышленной частоты ЭДС (50 Гц) ротор такого генератора необходимо вращать с частотой $n_1 = 3\,000$ об/мин, тогда $f_1 = 1 \cdot 3\,000/60 = 50$ Гц.

Постоянные магниты на роторе применяются лишь в синхронных генераторах весьма малой мощности в большинстве же синхронных генераторов для получения возбуждающего магнитного поля применяют обмотку возбуждения, располагаемую на роторе. Эта обмотка подключается к источнику постоянного тока через скользящие контакты, осуществляемые посредством двух контактных колец, располагаемых на валу и изолированных от вала и друг от друга, и двух неподвижных щеток (рис. 72).

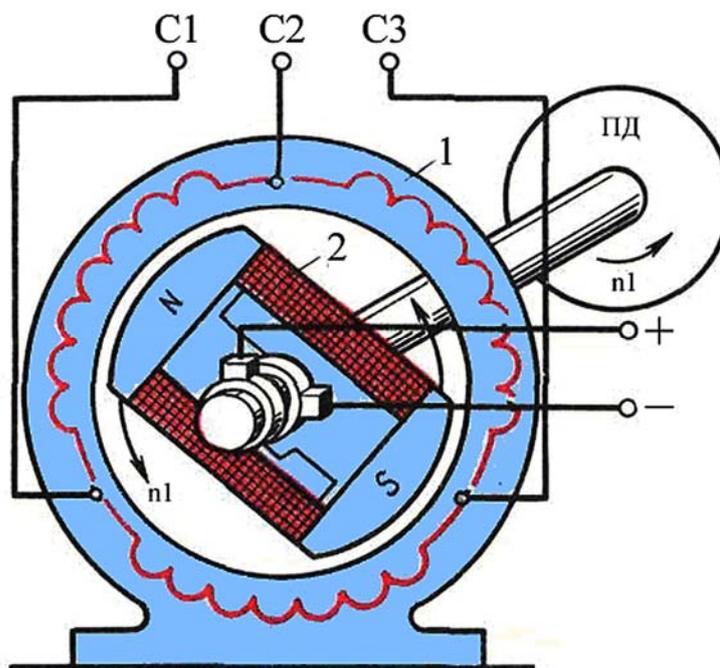


Рис. 72. Электромагнитная схема синхронного генератора

Как уже отмечалось, приводной двигатель (ПД) приводит во вращение ротор синхронного генератора с синхронной частотой n_1 . При этом магнитное поле ротора также вращается с частотой n_1 и индуцирует в трехфазной обмотке статора переменные ЭДС E_A, E_B, E_C , которые, будучи одинаковыми по значению и сдвинутыми по фазе относительно друг друга на $1/3$ периода (120 эл. град), образуют трехфазную симметричную систему ЭДС.

С подключением нагрузки в фазах обмотки статора появляются токи I_A, I_B, I_C . При этом трехфазная обмотка статора создает вращающееся магнитное поле. Частота вращения этого поля равна частоте вращения ротора генератора, об/мин:

$$n_1 = f_1 60/p.$$

Таким образом, в синхронном генераторе поле статора и ротор вращаются синхронно, отсюда и название — синхронные машины.

3.3. Характеристики синхронного генератора

Свойства синхронного генератора определяются характеристиками холостого хода, короткого замыкания, внешними и регулировочной.

Характеристика холостого хода синхронного генератора. Представляет собой график зависимости напряжения на выходе генератора в режиме х.х. $U_1 = E_0$ от тока возбуждения I_{B0} при $n_1 = \text{const}$. Схема включения синхронного генератора для снятия характеристики х.х. приведена на рис. 73, а.

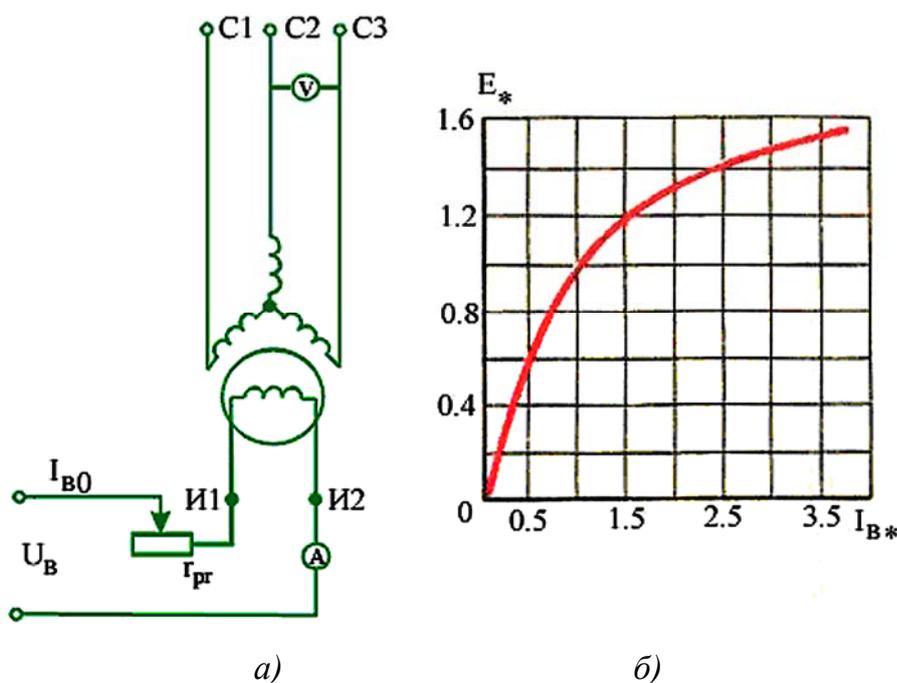


Рис. 73. Опыт холостого хода синхронного генератора

Если характеристики х.х. различных синхронных генераторов изобразить в относительных единицах $E^* = f(I_{в*})$, то эти характеристики мало отличаются друг от друга и будут очень схожи с нормальной характеристикой х.х. (рис. 73, б), которую используют при расчетах синхронных машин:

$$E^* \quad 0,58 \quad 1,0 \quad 1,21 \quad 1,33 \quad 1,40 \quad 1,46 \quad 1,51;$$

$$I_{в*} \quad 0,5 \quad 1,0 \quad 1,5 \quad 2,0 \quad 2,5 \quad 3,0 \quad 3,5,$$

где E^* — относительная ЭДС фазы обмотки статора:

$$E^* = E_0 / U_{1\text{НОМ}};$$

$I_{в*}$ — относительный ток возбуждения:

$$I_{в*} = I_{в0} / I_{в0\text{НОМ}};$$

$I_{в0\text{НОМ}}$ — ток возбуждения в режиме х.х., соответствующий ЭДС х.х.

$$E_0 = U_{1\text{НОМ}}.$$

Характеристика короткого замыкания. Характеристику трехфазного к.з. получают следующим образом: выводы обмотки статора замыкают накоротко (рис. 74, а) и при вращении ротора с частотой вращения n_1 постепенно увеличивают ток возбуждения до значения, при котором ток к.з. превышает номинальный рабочий ток статорной обмотки не более чем на 25% ($I_{1к} = 1,25I_{1\text{НОМ}}$).

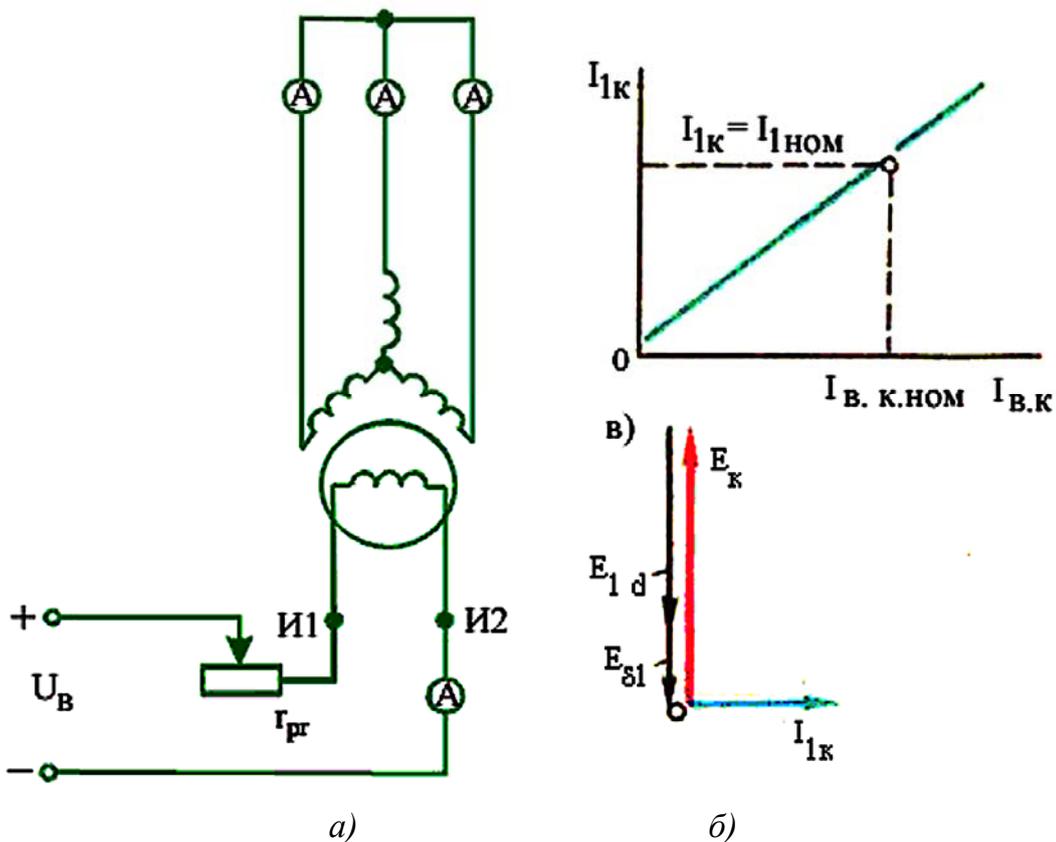


Рис. 74. Опыт холостого замыкания синхронного генератора:
а — схема; б — график; в — векторная диаграмма

Так как в этом случае ЭДС обмотки статора имеет значение в несколько раз меньше, чем в рабочем режиме генератора, и, следовательно, основной магнитный поток весьма мал, то магнитная цепь машины оказывается ненасыщенной. По этой причине характеристика к.з. представляет собой прямую линию (рис. 74, б). Активное сопротивление обмотки статора невелико по сравнению с ее индуктивным сопротивлением, поэтому, принимая $r_1 = 0$, можно считать, что при опыте к.з. нагрузка синхронного генератора (его собственные обмотки) является чисто индуктивной. Из этого следует, что при опыте к.з. реакция якоря синхронного генератора имеет продольно-размагничивающий характер.

Векторная диаграмма, построенная для генератора при опыте трехфазного к.з., представлена на рис. 74, в. Из диаграммы видно, что ЭДС E_k , индуцируемая в обмотке статора, полностью уравнивается ЭДС продольной реакции якоря $\dot{E}_{1d} = j\dot{I}_d x_{ad}$ и ЭДС рассеяния $\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 x_1$:

$$\dot{E}_k = \dot{E}_{1d} + \dot{E}_{\sigma 1}.$$

При этом МДС обмотки возбуждения имеет как бы две составляющие; одна компенсирует падение напряжения $j\dot{I}_1 x_1$, а другая компенсирует размагничивающее влияние реакции якоря $j\dot{I}_d x_{ad}$.

Характеристики к.з. и х.х. дают возможность определить значения токов возбуждения, соответствующие указанным составляющим МДС возбуждения. С этой целью характеристики х.х. и к.з. строят в одних осях (рис. 75), при этом на оси ординат отмечают относительные значения напряжения х.х. $E^* = E_0/U_{1ном}$ и тока к.з. $I_{k*} = I_{1k}/I_{1ном}$.

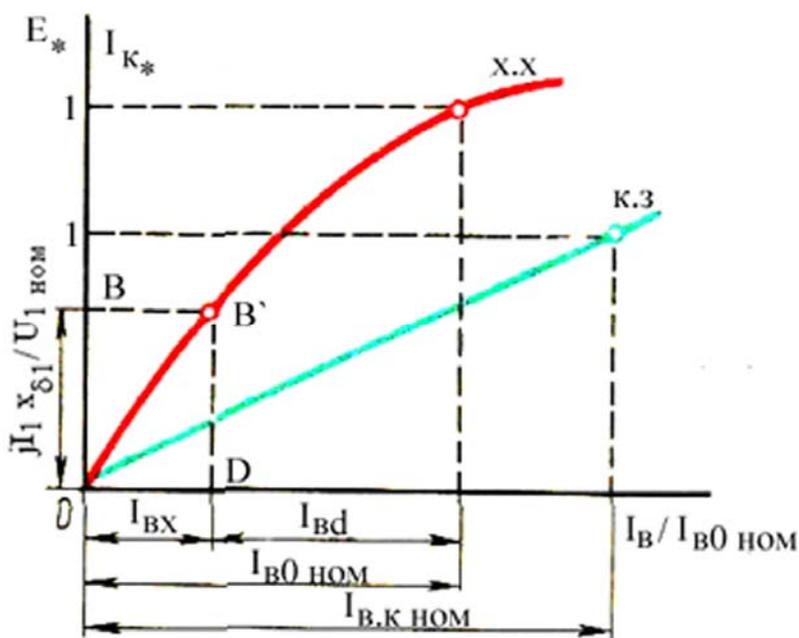


Рис. 75. Определение составляющих тока к.з.

На оси ординат откладывают отрезок $ОВ$, выражающий в масштабе напряжения значение ЭДС рассеяния. Затем точку $В$ сносят на характеристику х.х., (точка $В'$) и опускают перпендикуляр $В'D$ на ось абсцисс. Полученная таким образом точка $Д$ разделила ток возбуждения $I_{\epsilon 0 \text{ ном}}$ на две части: $I_{\epsilon \kappa}$ — ток возбуждения, необходимый для компенсации падения напряжения $j\dot{I}_1 x_1$ и I_{bd} — ток возбуждения, компенсирующий продольно-размагничивающую реакцию якоря.

Один из важных параметров синхронной машины — *отношение короткого замыкания (ОКЗ)*, которое представляет собой отношение тока возбуждения $I_{\epsilon 0 \text{ ном}}$, соответствующего номинальному напряжению при х.х., к току возбуждения $I_{\epsilon \kappa \text{ ном}}$, соответствующему номинальному току статора при опыте к.з.:

$$OK3 = I_{\epsilon 0 \text{ ном}} / I_{\epsilon \kappa \text{ ном}}$$

Для турбогенераторов $OK3 = 0,4-0,7$; для гидрогенераторов $OK3 = 1,0 \div 1,4$. ОКЗ имеет большое практическое значение при оценке свойств синхронной машины: машины с малым ОКЗ менее устойчивы при параллельной работе имеют значительные колебания напряжения при изменениях нагрузки, но такие машины имеют меньшие габариты и, следовательно, дешевле, чем машины с большим ОКЗ.

Внешняя характеристика. Представляет собой зависимость напряжения на выводах обмотки статора от тока нагрузки: $U_1 = f(I_1)$ при $I_\epsilon = \text{const}$; $n_1 = n_{1 \text{ ном}} = \text{const}$. На рис. 76, а представлены внешние характеристики, соответствующие различным по характеру нагрузкам синхронного генератора.

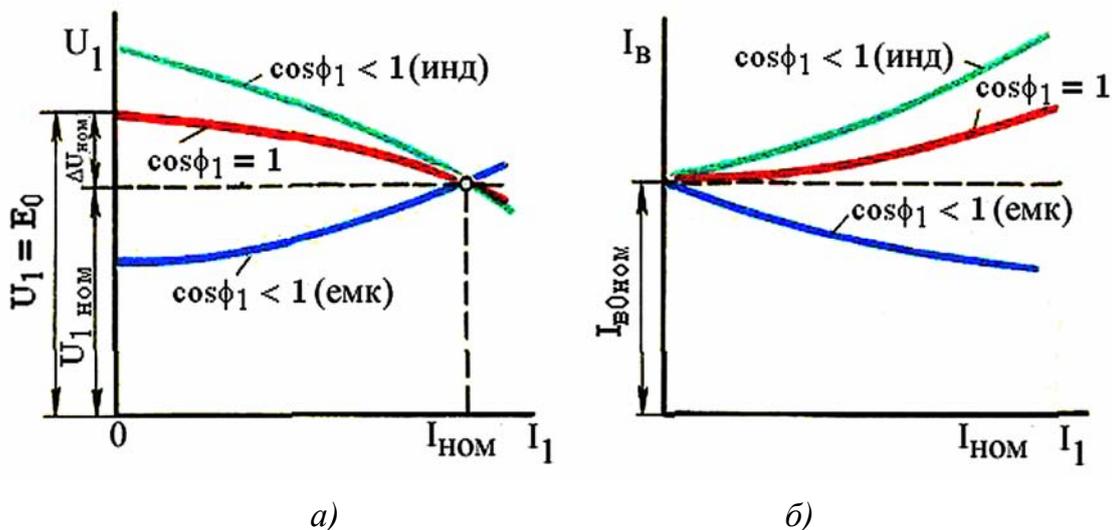


Рис. 76. Внешние (а) и регулировочные (б) характеристики синхронного генератора

При активной нагрузке ($\cos \varphi_1 = 1$) уменьшение тока нагрузки I_1 сопровождается ростом напряжения U_1 , что объясняется уменьшением падения напряжения в обмотке статора и ослаблением размагничивающего действия реакции якоря по поперечной оси. При индуктивной нагрузке ($\cos \varphi_1 < 1$, инд.) увеличение U_1 при сбросе нагрузки более интенсивно, так как с уменьшением тока I_1 ослабляется размагничивающее действие продольной составляющей реакции якоря. Однако в случае емкостной нагрузки генератора ($\cos \varphi_1 < 1$, емк.) уменьшение I_1 сопровождается уменьшением напряжения U_1 , что объясняется ослаблением подмагничивающего действия продольной составляющей реакции якоря.

Изменение напряжения синхронного генератора, вызванное сбросом номинальной нагрузки при $I_B = \text{const}$ и $n_1 = \text{const}$, называется номинальным изменением (повышением) напряжения, %:

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{E_0 - U_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} 100.$$

В процессе эксплуатации синхронного генератора напряжение U_1 при колебаниях нагрузки поддерживается неизменным посредством быстродействующих автоматических регуляторов. Однако во избежание повреждения изоляций обмотки дельта $U_{\text{ном}}$ не должно превышать 50%.

Регулировочная характеристика. Она показывает, как следует изменять ток возбуждения генератора при изменениях нагрузки, чтобы напряжение на зажимах генератора оставалось неизменно равным номинальному: $I_e = f(I_1)$ при $U_1 = U_{1\text{ном}} = \text{const}$; $n_1 = n_{\text{ном}} = \text{const}$. На рис. 75, б представлены регулировочные характеристики синхронного генератора. При активной нагрузке ($\cos \varphi_1 = 1$) увеличение тока нагрузки I_1 сопровождается уменьшением напряжения U_1 , поэтому для поддержания этого напряжения неизменным по мере увеличения тока нагрузки I_1 следует повышать ток возбуждения. Индуктивный характер нагрузки ($\cos \varphi_1 < 1$, инд.) вызывает более резкое понижение напряжения U_1 (рис. 76, а), поэтому ток возбуждения I_e , необходимый для поддержания $U_1 = U_{1\text{ном}}$, следует повышать в большей степени. При емкостном же характере нагрузки ($\cos \varphi_1 < 1$, емк.) увеличение нагрузки сопровождается ростом напряжения U_1 , поэтому для поддержания $U_1 = U_{1\text{ном}}$ ток возбуждения следует уменьшать.

3.4. Потери и КПД синхронных машин

Преобразование энергии в синхронной машине связано с потерями энергии. Все виды потерь в синхронной машине разделяются на основные и добавочные.

Основные потери в синхронной машине состоят из электрических потерь в обмотке статора, потерь на возбуждение, магнитных потерь и механических потерь.

Электрические потери в обмотке статора, Вт

$$P_{\text{э}} = m_1(I_1)^2 r_1,$$

где r_1 — активное сопротивление одной фазы обмотки статора при расчетной рабочей температуре, Ом.

Потери на возбуждение, Вт:

а) при возбуждении от отдельного возбуждательного устройства:

$$P_B = (I_B)^2 r_B + \Delta U_{\text{щ}} I_B,$$

где r_B — активное сопротивление обмотки возбуждения при расчетной рабочей температуре, Ом;

$\Delta U_{\text{щ}}$ — падение напряжения в щеточном контакте щеток:

$$\Delta U_{\text{щ}} = 2 \text{ В};$$

б) при возбуждении от генератора постоянного тока (возбудителя), сочлененного с валом синхронной машины

$$P_B = \frac{(I_B)^2 r_B + \Delta U_{\text{щ}} I_B}{\eta_B},$$

где η_B — КПД возбудителя, $\eta_B = 0,80 \div 0,85$.

Магнитные потери синхронной машины происходят в сердечнике статора, который подвержен перемагничиванию вращающимся магнитным полем. Эти потери состоят из потерь от гистерезиса P_r и потерь от вихревых токов $P_{\text{в.т.}}$:

$$P_M = P_r + P_{\text{в.т.}}$$

Механические потери, Вт, равные сумме потерь на трение в подшипниках и потерь на вентиляцию (при самовентиляции машины),

$$P_{\text{мех}} = 3,68 \rho \left(\frac{v_2}{40} \right)^3 \sqrt{10^3 l_1},$$

где v_2 — окружная скорость на поверхности полюсного наконечника ротора, м/с:

$$v_2 = \frac{\pi(D_1 - 2\delta)n_2}{60};$$

l_1 — конструктивная длина сердечника статора, мм.

Добавочные потери в синхронных машинах разделяются на два вида: пульсационные потери в полюсных наконечниках ротора и потери при нагрузке.

Добавочные пульсационные потери P_n в полюсных наконечниках ротора обусловлены пульсацией магнитной индукции в зазоре из-за зубчатости внутренней поверхности статора.

Значение этих потерь, Вт:

$$P_n = k_n p b_p l_1 (10^{-4} Z_1 n_1)^{1,5} [B_p (k_{t1} - 1) t_1]^2 \cdot 10^{-6},$$

где k_n — коэффициент, учитывающий толщину листов полюсов ротора (при толщине листов 1 мм $k_n = 4,6$; при толщине листов 2 мм $k_n = 8,6$; при массивных полюсных наконечниках $k_n = 23,3$);

b_p — ширина полюсного наконечника, мм;

Z_1 — число пазов на статоре;

B_p — магнитная индукция в зазоре, Тл;

k_{t1} — коэффициент воздушного зазора статора;

t_1 — зубцовое деление статора, мм.

Добавочные потери при нагрузке $P_{доб}$ в синхронных машинах определяют в процентах от подводимой мощности двигателей или от полезной мощности генераторов. Для синхронных машин мощностью до 1 000 кВт добавочные потери при нагрузке принимают равными 0,5%, а для машин мощностью более 1 000 кВт — 0,25-0,4%. Суммарные потери в синхронной машине, кВт:

$$\sum P = (P_{э1} + P_B + P_{M1} + P_{МEX} + P_n + P_{доб}) \cdot 10^{-3}.$$

Коэффициент полезного действия:

– для синхронного генератора:

$$\eta_G = \frac{1 - \sum P}{(P_{ном} + \sum P)},$$

где $P_{ном}$ — активная мощность, отбираемая от генератора при его номинальной нагрузке, кВт:

$$P_{ном} = m_1 U_{1ном} I_{1ном} \cos \varphi_1 \cdot 10^{-3}.$$

– для синхронного двигателя:

$$\eta_L = \frac{1 - \sum P}{P_{1ном}},$$

где $U_{1ном}$ и $I_{1ном}$ — фазные значения напряжения и тока статора.

КПД синхронной машины зависит от величины нагрузки:

$$\beta = P_2 / P_{ном}.$$

КПД синхронных машин мощностью до 100 кВт составляет 80-90%, у более мощных машин КПД достигает 92-99%. Более высокие значения КПД относятся к турбо- и гидрогенераторам мощностью в десятки и даже сотни тысяч киловатт.

3.5. Пуск синхронных двигателей

Пуск синхронного двигателя непосредственным включением в сеть невозможен, так как ротор из-за своей значительной инерции не может быть сразу увлечен вращающимся полем статора, частота вращения которого устанавливается мгновенно. В результате устойчивая магнитная связь между статором и ротором не возникает. Для пуска синхронного двигателя приходится применять специальные способы, сущность которых состоит в предварительном приведении ротора во вращение до синхронной или близкой к ней частоте, при которой между статором и ротором устанавливается устойчивая магнитная связь.

В настоящее время практическое применение имеет способ пуска, получивший название асинхронного. Этот способ пуска возможен при наличии в полюсных наконечниках ротора пусковой обмотки (клетки), аналогичной успокоительной обмотке синхронного генератора. Схема включения двигателя при этом способе пуска приведена на рис. 77, а.

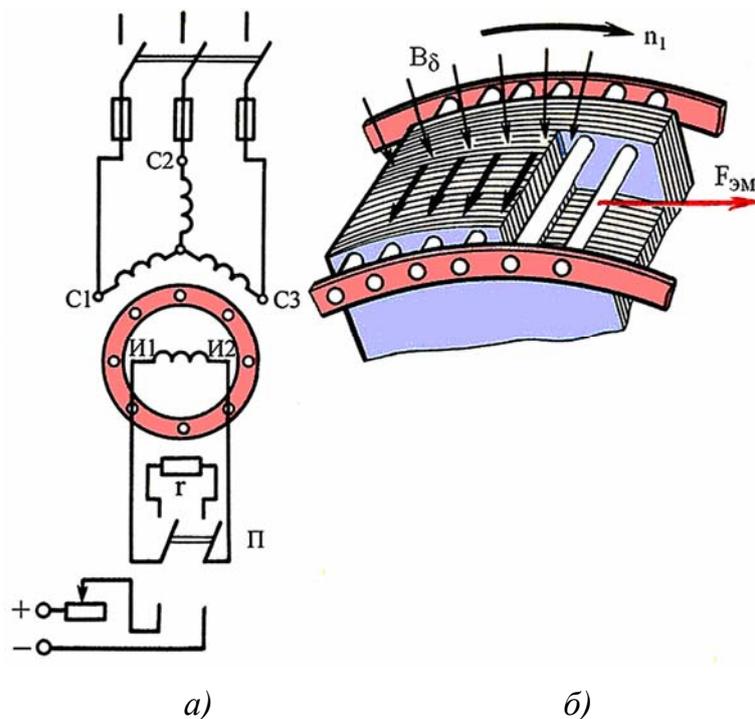


Рис. 77. Асинхронный пуск синхронного двигателя

Невозбужденный синхронный двигатель включают в сеть. Возникшее при этом вращающееся магнитное поле статора наводит в стержнях пусковой клетки ЭДС, которые создают токи I_2 . Взаимодействие этих токов с полем статора вызывает появление на стержнях пусковой клетки электромагнитных сил $F_{эм}$. Под действием этих сил ротор приводится во вращение (рис. 77, б). После разгона ротора до частоты вращения, близкой к синхронной ($n_2 = 0,95n_1$), обмотку возбуждения подключают

к источнику постоянного тока. Образующийся при этом синхронный момент втягивает ротор двигателя в синхронизм. После этого пусковая обмотка двигателя выполняет функцию успокоительной обмотки, ограничивая качания ротора.

Чем меньше нагрузка на валу двигателя, тем легче его вхождение в синхронизм. Явнополюсные двигатели малой мощности, пускаемые без нагрузки на валу, иногда входят в синхронизм лишь за счет реактивного момента, т.е. даже без включения обмотки возбуждения.

С увеличением нагрузочного момента на валу вхождение двигателя в синхронизм затрудняется. Наибольший нагрузочный момент, при котором ротор синхронного двигателя еще втягивается в синхронизм, называют моментом входа двигателя в синхронизм M_{ex} . Величина асинхронного момента M_a при частоте вращения $n_2 = 0,95n_1$ зависит от активного сопротивления пусковой клетки, т. е. от сечения стержней и удельного электрического сопротивления металла, из которого они изготовлены.

Следует обратить внимание, что выбор сопротивления пусковой клетки r_2'' , соответствующего значительному пусковому моменту (M_n''), способствует уменьшению момента входа в синхронизм (M_{ex}'') и, наоборот, при сопротивлении r_2' , соответствующем небольшому пусковому моменту (M_n'), момент входа в синхронизм увеличивается ($M_{ex}' > M_{ex}''$) (рис. 78).

В процессе асинхронного пуска обмотку возбуждения нельзя оставлять разомкнутой, так как магнитный поток статора, пересекающий ее в начальный период пуска с синхронной скоростью, наводит в ней ЭДС. Вследствие большого числа витков обмотки возбуждения эта ЭДС достигает значений, опасных как для целостности изоляции самой обмотки, так и для обслуживающего персонала. Для предотвращения этого обмотку возбуждения на период разгона ротора замыкают на активное сопротивление r , примерно в десять раз большее сопротивления обмотки возбуждения. Переключение зажимов $И1$ и $И2$ обмотки возбуждения с сопротивления r на зажимы возбuditеля осуществляют переключателем $П$ (см. рис. 77, а).

Замыкание накоротко обмотки возбуждения на время пуска двигателя нежелательно, так как при этом обмотка ротора образует однофазный замкнутый контур, взаимодействие которого с вращающимся полем статора также создает дополнительный асинхронный момент M_d . Однако при частоте вращения, равной половине синхронной, этот момент становится тормозящим (рис. 78) и создает «провал» в характеристике пускового (асинхронного) момента (пунктирная кривая). Это заметно ухудшает пусковые свойства синхронного двигателя.

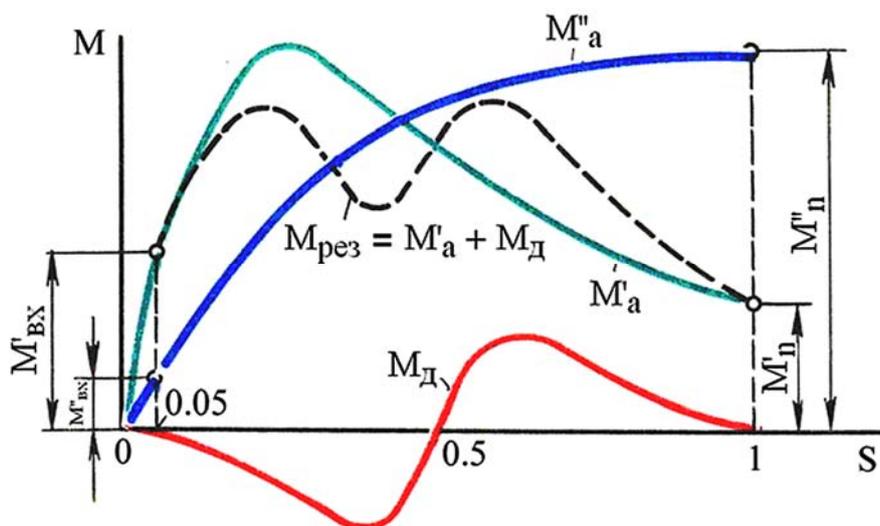


Рис. 78. Асинхронные моменты при пуске синхронного двигателя:
 M_a — основной момент; $M_д$ — дополнительный момент;
 $M_{вх}$ — момент входа в синхронизм

При асинхронном пуске синхронного двигателя возникает значительный пусковой ток. Поэтому пуск синхронных двигателей непосредственным включением в сеть на номинальное напряжение применяют при достаточной мощности сети, способной выдерживать без заметного падения напряжения броски пускового тока пяти- или семикратного значения (по сравнению с номинальным током). Если же мощность сети недостаточна, то можно применить пуск двигателя при пониженном напряжении: автотрансформаторный или реакторный.

3.6. U-образные кривые и рабочие характеристики синхронного двигателя

U-образные кривые. В процессе работы синхронного двигателя в его обмотке статора наводятся ЭДС, сумма которых приблизительно равна подведенному к обмотке статора напряжению сети \dot{U}_c . Эта сумма ЭДС эквивалентна результирующему магнитному полю, вызванному действием двух магнитодвижущихся сил: возбуждения $F_\theta \equiv I_\theta$ и статора $F_1 = I_1$.

При неизменном напряжении сети $\dot{U}_c \approx -\sum \dot{E} = \text{const}$ результирующее магнитное поле постоянно. Поэтому при изменении МДС возбуждения F_θ (изменении тока возбуждения I_θ) МДС статора изменяется таким образом, чтобы их совместное действие оставалось неизменным, т.е. чтобы оставалось неизменным результирующее магнитное поле синхронного двигателя. Это изменение МДС F_1 может происходить только за счет изменения величины и фазы тока статора \dot{I}_1 , т.е. за счет изменения реактивной составляющей тока статора I_d .

Например, при увеличении тока возбуждения I_e , начиная от наименьшего его значения ($I_e = 0$), возрастает МДС ротора, при этом МДС статора уменьшается. Это уменьшение МДС происходит при уменьшении индуктивной (по отношению к напряжению сети \dot{U}_c) составляющей тока статора I_d , которая оказывает на магнитную систему подмагничивающее влияние.

При этом полный ток статора $\dot{I}_1 = \dot{I}_q + \dot{I}_d$ уменьшается, а коэффициент мощности двигателя увеличивается. При некотором значении тока возбуждения I_e' индуктивная составляющая тока статора падает до нуля. При этом ток статора достигнет минимального (при данной нагрузке) значения, так как станет чисто активным ($\dot{I}_1 = \dot{I}_q$), а коэффициент мощности $\cos \varphi_1 = 1$.

Увеличение тока возбуждения сверх значения I_e' , т.е. перевозбуждение двигателя, вызовет увеличение тока \dot{I}_1 , но теперь этот ток будет опережающим (емкостным) по отношению к напряжению U_c . Таким образом, при недовозбуждении ($I_e < I_e'$) синхронный двигатель работает с отстающим током, а при перевозбуждении ($I_e > I_e'$) — с опережающим. Зависимость тока статора от тока возбуждения для синхронного двигателя представлена U-образными кривыми (рис. 79). Ток возбуждения I_e соответствует работе синхронного двигателя при коэффициенте мощности $\cos \varphi_1 = 1$. При перевозбуждении двигателя в цепи статора появляется опережающий ток.

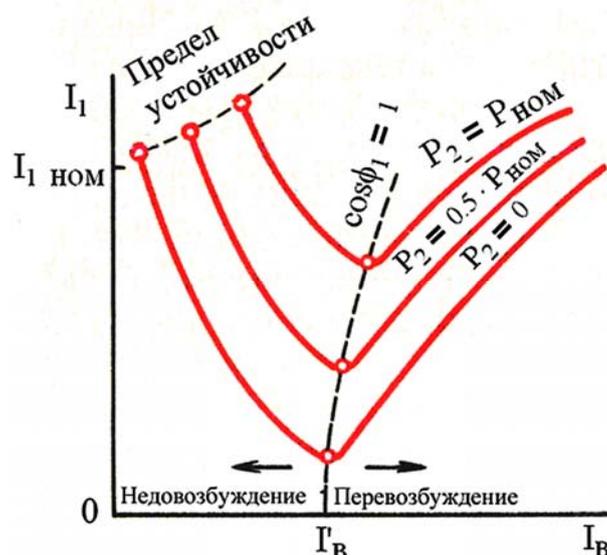


Рис. 79. U-образные характеристики синхронного двигателя

Иначе говоря, синхронный двигатель является генератором реактивного тока: индуктивного по отношению к напряжению сети при недовозбуждении и емкостного при перевозбуждении. Указанная способность синхронных двигателей является их ценным качеством, которое используют для повышения коэффициента мощности электрических установок.

Асинхронные двигатели, являющиеся наиболее распространенными потребителями электроэнергии, работают с $\cos \varphi_1 < 1$, создавая в сетях значительные индуктивные токи. Если же параллельно группе асинхронных двигателей включить один или несколько синхронных двигателей, работающих с перевозбуждением, то возникающая в сети емкостная составляющая тока будет частично или полностью компенсировать индуктивную составляющую тока, обусловленную работой асинхронных двигателей. При этом электрическая система, разгруженная от реактивных токов, будет работать с $\cos \varphi_1 \approx 1$, что способствует уменьшению потерь электроэнергии. Необходимо, однако, отметить, что при перевозбуждении синхронный двигатель потребляет значительный ток статора. Поэтому синхронные двигатели, предназначенные для работы с перевозбуждением, имеют несколько большие габариты, а их КПД меньше, чем у двигателей, предназначенных для работы с $\cos \varphi_1 = 1$, когда ток статора и потери двигателя имеют минимальные значения.

Аналогично синхронному генератору, включенному на параллельную работу с сетью, синхронный двигатель имеет предел устойчивости при минимальном токе возбуждения.

Рабочие характеристики. Рабочие характеристики синхронного двигателя представляют собой зависимость частоты вращения ротора n_2 , потребляемой мощности P_1 полезного момента M_2 , коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ и тока в обмотке статора I_1 от полезной мощности двигателя P_2 (рис. 80).

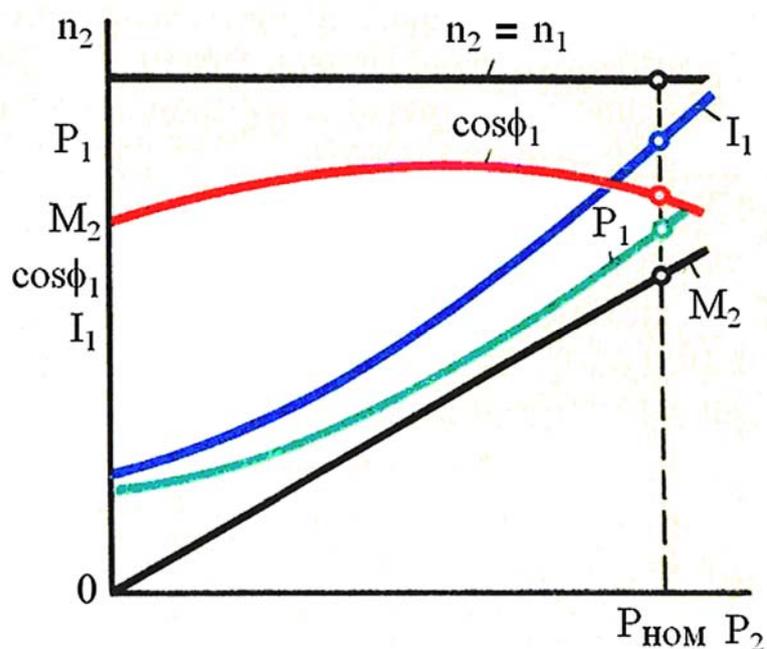


Рис. 80. Рабочие характеристики синхронного двигателя

Частота вращения ротора n_2 всегда равна синхронной частоте $n_1 = f_1 60/p$, поэтому график $n_2 = f(P_2)$ имеет вид прямой, параллельной оси абсцисс. Полезный момент на валу синхронного двигателя $M_2 = P_2/\omega_1$. Так как рабочие характеристики снимают при условии $f_1 = \text{const}$, то график $M_2 = f(P_2)$ имеет вид прямой, выходящей из начала координат. Мощность на входе двигателя $P_1 = P_2 + \Sigma P$. С ростом нагрузки на валу двигателя увеличиваются также и потери P , поэтому потребляемая мощность P_1 растет быстрее полезной мощности P_2 и график $P_1 = f(P_2)$ имеет несколько криволинейный вид.

Вид графика $\cos \varphi_1 = f(P_2)$ зависит от вида настройки тока возбуждения: если в режиме х.х. ток возбуждения установлен таким, что $\cos \varphi_1 = 1$, то с ростом нагрузки коэффициент мощности снижается, если же установить $\cos \varphi_1 = 1$ при номинальной нагрузке, то при недогрузке двигатель будет забирать из сети реактивный опережающий ток, а при перегрузке — отстающий. Обычно устанавливают ток возбуждения таким, чтобы $\cos \varphi = 1$ при средней нагрузке (см. рис. 80). В этом случае коэффициент мощности во всем диапазоне нагрузок остается достаточно высоким. Если же установить ток в обмотке возбуждения синхронного двигателя таким, чтобы $\cos \varphi_1 = 1$ был при нагрузке несколько превышающей номинальную, то при номинальной нагрузке $\cos \varphi_1 \approx 0,8$ и двигатель будет потреблять из сети опережающий по отношению к напряжению сети ток, что приведет к повышению коэффициента мощности этой сети. В этом отношении синхронные двигатели выгодно отличаются от асинхронных, работающих с отстающим по фазе током (особенно при недогрузке двигателя) и снижающих энергетические показатели питающей сети.

Ток в обмотке статора двигателя $I_1 = P_1/(m_1 U_1 \cos \varphi_1)$. Из этого выражения видно, что ток I_1 с увеличением нагрузки на валу двигателя растет быстрее, чем потребляемая мощность P_1 , вследствие уменьшения $\cos \varphi_1$.

Так как ротор синхронного двигателя вращается в ту же сторону, что и поле статора, то направление вращения ротора определяется порядком следования фаз линейных проводов, подведенных к обмотке статора, и порядком расположения фаз обмотки статора. Для изменения направления вращения трехфазного синхронного двигателя необходимо переключить два линейных провода, подведенных из сети к выводам обмотки статора.

В заключение необходимо отметить, что синхронные двигатели по сравнению с асинхронными имеют преимущество, заключающееся в том, что они могут работать с $\cos \varphi_1 = 1$, не создавая в питающей сети индуктивных токов, вызывающих дополнительные потери энергии. Более того, при работе с перевозбуждением синхронные двигатели создают в сети ем-

костный ток, чем способствуют повышению коэффициента мощности энергосистемы в целом. Другое достоинство синхронных двигателей состоит в том, что, основная составляющая электромагнитного момента пропорциональна напряжению сети U_1 , а у асинхронных двигателей электромагнитный момент пропорционален U_1^2 . По этой причине при понижении напряжения в сети синхронные двигатели сохраняют большую перегрузочную способность, чем асинхронные. К недостаткам синхронных двигателей относятся их более сложная конструкция и повышенная стоимость по сравнению с асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором. Кроме того, для работы синхронного двигателя требуется устройство для питания постоянным током обмотки возбуждения.

Опыт эксплуатации показал, что применение синхронных двигателей общего назначения наиболее целесообразно при мощности 200 кВт и более в установках, не требующих частых пусков и регулирования частоты вращения (мощные насосы, вентиляторы, компрессоры и т. п.).

3.7. Синхронный компенсатор

Синхронный компенсатор (СК) представляет собой синхронную машину, предназначенную для генерирования реактивной мощности. Синхронный компенсатор включают в электрическую систему с целью повышения ее коэффициента мощности.

Принцип происходящих при этом явлений состоит в том, что необходимую для работы некоторых потребителей реактивную мощность вырабатывает не синхронный генератор, установленный на электростанции, а синхронный компенсатор, установленный в непосредственной близости к потребителю. К числу потребителей переменного тока, требующих значительной реактивной мощности, в первую очередь относятся асинхронные двигатели. На рисунке 81 показана система, состоящая из синхронного генератора (СГ), повышающего ТрI и понижающего ТрII трансформаторов, линии электропередачи (ЛЭП), потребителя Z и синхронного компенсатора (СК), включенного непосредственно на входе потребителя. Синхронный компенсатор, включенный в сеть, работает как синхронный двигатель без нагрузки ($P_2 = 0$), т. е. в режиме х.х., и при этом вырабатывает реактивную мощность $Q_{СК}$, необходимую для работы потребителя Z, например группы асинхронных двигателей. Благодаря этому реактивная мощность в СГ и ЛЭП доведена до некоторого минимального значения Q_{min} . Это способствует повышению технико-экономических показателей всей электрической системы.

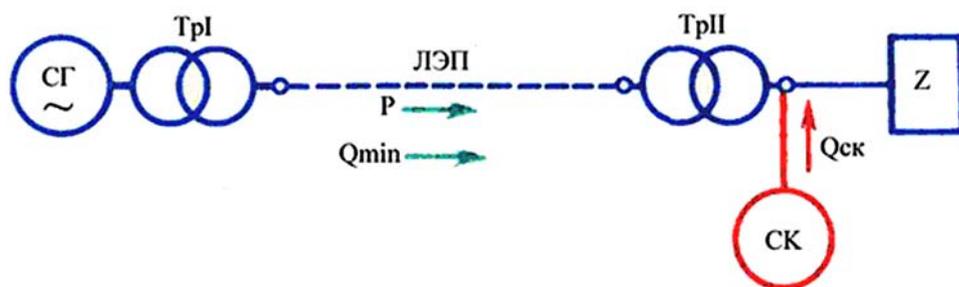


Рис. 81. Схема включения синхронного компенсатора в электрическую систему

Для пояснения явлений, связанных с подключением СК к электрической системе, рассмотрим рис. 82. При подключении потребителя Z к сети с напряжением U_c (рис. 82, а) в сети возникает ток I_z , отстающий по фазе от напряжения \dot{U}_c на угол φ_z , обусловленный значительной индуктивной составляющей тока I_z . При подключении СК параллельно потребителю Z и создании в СК режима перевозбуждения (рис. 82, б) в сети появится ток $I_{СК}$, опережающий по фазе напряжение \dot{U}_c на угол 90° . Результирующий ток в сети $\dot{I}_c = \dot{I}_z + \dot{I}_{СК}$.

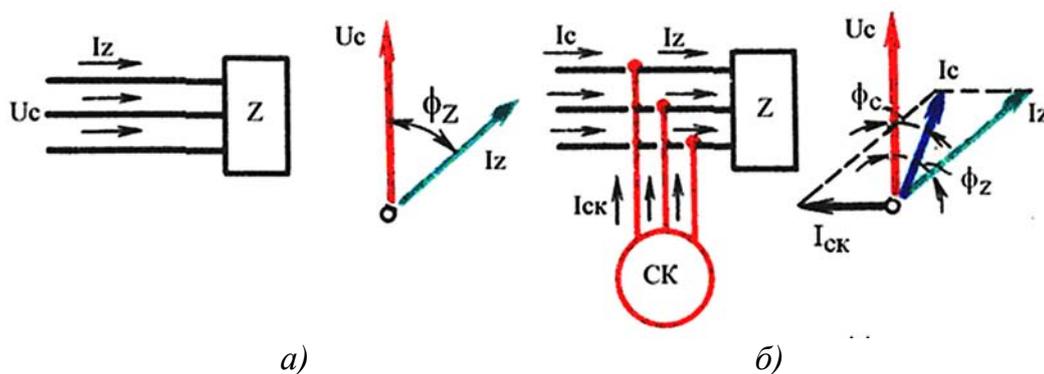


Рис. 82. Применение синхронного компенсатора для повышения коэффициента мощности сети

Фазовый сдвиг этого тока относительно напряжения сети \dot{U}_c (угол φ_c) намного меньше угла фазового сдвига до включения СК (угол φ_z). Кроме того, ток I_c станет меньше ($I_c < I_z$). В этом можно убедиться исходя из следующих соображений. Так как СК работает без нагрузки на валу, то его активная мощность не велика и определяется потерями х.х. в компенсаторе. Пренебрегая этими потерями, можно активную мощность в сети до подключения СК

$$P_c = P_z = \sqrt{3} I_z U_c \cos \varphi_z$$

приравнять к активной мощности сети после подключения СК:

$$P_c' = \sqrt{3} I_c U_c \cos \varphi_c.$$

Но так как $P_c = P_c'$, а $\cos \varphi_c > \cos \varphi_z$, то $I_c < I_z$. В результате синхронный генератор и линия электропередачи разгружаются, и потери мощности в них уменьшаются.

В некоторых случаях СК работают с недовозбуждением. Необходимость в этом возникает, если ток в системе содержит значительную емкостную составляющую, которая не компенсируется индуктивной составляющей тока потребителей. Обычно степень возбуждения СК регулируют посредством автоматических устройств.

Синхронные компенсаторы применяют также для стабилизации напряжения в сети при передаче энергии по линиям большой протяженности. При больших индуктивных нагрузках напряжение в конце линии (у потребителей) оказывается намного меньше, чем в начале; при малых нагрузках, наоборот, под влиянием емкостных сопротивлений линии напряжение в конце линии может даже повышаться по сравнению с напряжением в начале. Если же в конце линии (у потребителей) включить СК, работающий при больших нагрузках с перевозбуждением и при малых нагрузках с недовозбуждением, то это позволит поддерживать напряжение в конце линии практически неизменным.

Условия нагревания СК при опережающем токе (при перевозбуждении) более тяжелые, чем при отстающем (при недовозбуждении), поэтому номинальной мощностью компенсатора считают мощность при перевозбуждении.

Обычно коэффициент мощности увеличивают до 0,92-0,95, так как экономия, получаемая от повышения коэффициента мощности до единицы, не оправдывает увеличивающихся расходов, обусловленных возросшей мощностью синхронного компенсатора. Так, если в рассматриваемом примере потребовалось бы увеличить коэффициент мощности в сети до единицы, то пришлось бы применить синхронный компенсатор мощностью 1 050 кВ·Ар, т.е. почти в два раза больше, чем при $\cos \varphi' = 0,95$.

Синхронные компенсаторы — это электрические машины большой мощности: от 10 до 160 тыс. кВ·А. Выполняют их обычно с горизонтальным расположением вала на напряжение от 6,6 до 16 кВ, частотой 50 Гц. Число полюсов в СК обычно составляет $2p = 6$ и 8 , что соответствует частоте вращения ротора 1 000 и 750 об/мин. В синхронных компенсаторах современных серий применен асинхронный пуск, поэтому ротор СК снабжен пусковой клеткой.

Вал компенсатора не передает вращающего момента, и поэтому при его расчете учитывают лишь силу тяжести ротора и силу магнитного притяжения. В итоге вал СК по сравнению с валом синхронного двигателя имеет уменьшенное сечение. Это способствует уменьшению габаритов и облегчению СК. Так как вал СК не имеет выступающего конца, то СК сравнительно легко герметизировать с целью применения в нем водородного охлаждения.

Наиболее важными характеристиками СК являются U -образные характеристики, определяющие основные параметры компенсатора: значения токов в обмотке статора и в обмотке возбуждения. В принципе эти характеристики не отличаются от U -образной характеристики синхронного двигателя в режиме х.х. ($P_2 = 0$). Указанные характеристики строят для разных напряжений сети.

Синхронный компенсатор не несет активной нагрузки (его электромагнитная мощность $P_{эм} \approx 0$) и работает при значении угла $\theta = 0$, что обеспечивает СК большую перегрузочную способность.

Контрольные вопросы к разделу 3

1. Объясните принцип действия генератора переменного тока.
2. Чем определяется форма графика ЭДС синхронного генератора?
3. Из каких участков состоит магнитная цепь явнополюсной синхронной машины?
4. В чем состоит явление реакции якоря?
5. Каково действие реакции якоря при активной, индуктивной и емкостной нагрузках синхронного генератора?
6. Почему характеристика к.з. синхронной машины имеет вид прямой линии?
7. Что такое номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки и почему при емкостной нагрузке его величина отрицательна?
8. Какие виды потерь имеют место в синхронной машине?
9. Чем ограничивается область устойчивой работы синхронного двигателя?
10. Объясните процесс пуска синхронного двигателя?
11. Как регулируется коэффициент мощности синхронного двигателя?
12. Каково назначение синхронного компенсатора?
13. Каковы достоинства и недостатки синхронных двигателей по сравнению с асинхронными?
14. Какая электрическая машина называется синхронной?
15. К какому источнику электрической энергии подключается обмотка статора синхронной машины?
16. Для какой цели сердечник статора синхронной машины набирается из отдельных пластин электротехнической стали?
17. В каких режимах могут работать синхронные машины?
18. Каковы устройство и принцип действия синхронной машины?
19. Какая часть синхронной машины называется якорем?
20. Какая часть синхронной машины называется индуктором?
21. Какую зависимость представляет собой характеристика холостого хода синхронного генератора?

22. Какие две конструкции ротора применяются в синхронных машинах?
23. Какие способы возбуждения применяются в синхронных машинах?
24. Из какого материала изготавливаются секции обмоток статора синхронной машины?
25. Изменится ли частота вращения ротора синхронной машины, если нагрузка на ее валу уменьшилась в три раза?
26. Какое количество полюсов должно быть у синхронного генератора, имеющего частоту тока 50 Гц, если ротор вращается с частотой 125 об/мин?
27. Какая часть синхронного генератора называется возбудителем?
28. Какую зависимость представляет собой характеристика короткого замыкания синхронного генератора?
29. По какой формуле определяется КПД синхронного двигателя?
30. Как называется синхронная машина, используемая для увеличения коэффициента мощности энергосистемы?
31. Как называется обмотка синхронной машины, в которой индуцируется ЭДС и протекает ток нагрузки?
32. Каковы условия снятия внешней характеристики синхронной машины?
33. Что представляют собой механические потери синхронной машины?
34. Какую зависимость представляет собой регулировочная характеристика синхронного генератора?
35. По какой формуле определяется КПД синхронного генератора?
36. В каком соотношении находятся частоты вращения магнитного поля статора и ротора синхронной машины?

4. КОЛЛЕКТОРНЫЕ МАШИНЫ

4.1. Назначение и области применения коллекторных машин

Электрические машины постоянного тока используются как в качестве генераторов, так и в качестве двигателей. Наибольшее применение имеют двигатели постоянного тока, области применения и диапазон мощности которых достаточно широки: от долей ватт (для привода устройств автоматики) до нескольких тысяч киловатт (для привода прокатных станков, шахтных подъемников и других механизмов). Двигатели постоянного тока широко используются для привода подъемных средств в качестве крановых двигателей и привода транспортных средств в качестве тяговых двигателей. Основные преимущества двигателей постоянного тока по сравнению с бесколлекторными двигателями переменного тока — хорошие пусковые и регулировочные свойства, возможность получения частоты вращения более 3 000 об/мин, а недостатки — относительно высокая стоимость, некоторая сложность в изготовлении и пониженная надежность. Все эти недостатки машин постоянного тока обусловлены наличием в них щеточно-коллекторного узла, который к тому же является источником радиопомех и пожароопасности. Эти недостатки ограничивают применение машин постоянного тока.

В последние годы созданы и успешно применяются двигатели постоянного тока, у которых механический коллектор заменен бесконтактным коммутатором на полупроводниковых элементах, однако подобные двигатели пока изготавливаются на мощность на более 500 Вт.

В данном разделе рассмотрены машины постоянного тока общего назначения, получившие наибольшее применение в современном электроприводе. Рассмотрены также некоторые виды машин постоянного тока специального назначения, главным образом применяемые в устройствах автоматики.

4.2. Принцип действия генератора и двигателя постоянного тока

Характерным признаком коллекторных машин является наличие у них коллектора — механического преобразователя переменного тока в постоянный и наоборот. Необходимость в таком преобразователе объясняется тем, что в обмотке якоря коллекторной машины должен протекать переменный ток, так как только в этом случае в машине происходит непрерывный процесс электромеханического преобразования энергии.

Рассмотрим принцип действия коллекторного генератора постоянного тока. На рис. 83 изображена упрощенная модель такого генератора: между полюсами N и S постоянного магнита находится вращающаяся

часть генератора — якорь, вал которого посредством шкива и ременной передачи механически связан с приводным двигателем (на рисунке не показан) — источником механической энергии. В двух продольных пазах на сердечнике якоря расположена обмотка в виде одного витка $abcd$, концы которого присоединены к двум медным изолированным друг от друга полукольцам, образующим простейший коллектор. На поверхность коллектора наложены щетки A и B , осуществляющие скользящий контакт с коллектором и связывающие генератор с внешней цепью, куда включена нагрузка сопротивлением R .

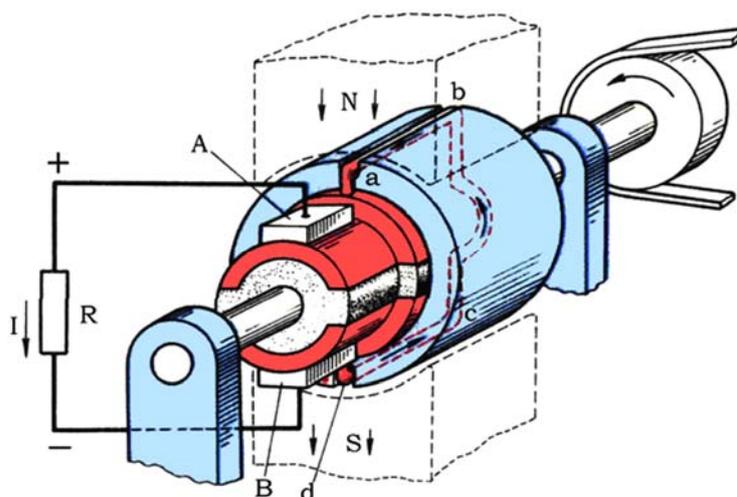


Рис. 83. Упрощенная модель коллекторной машины

Предположим, что приводной двигатель вращает якорь генератора против часовой стрелки, тогда в витке на якоря, вращающемся в магнитном поле постоянного магнита, наводится ЭДС, мгновенное значение которой $e = 2Blv$, а направление для положения якоря, изображенного на рисунке, указано стрелками.

В процессе работы генератора якорь вращается и виток $abcd$ занимает разное пространственное положение, поэтому в обмотке якоря наводится переменная ЭДС. Если бы в машине не было коллектора, то ток во внешней цепи (в нагрузке R) был бы переменным но посредством коллектора и щеток переменный ток обмотки якоря преобразуется в пульсирующий ток во внешней цепи генератора, т.е. ток, неизменный по направлению. При положении витка якоря, показанном на рис. 83, ток во внешней цепи (в нагрузке) направлен от щетки A к щетке B ; следовательно, щетка A является положительной, а — щетка B — отрицательной. После поворота якоря на 180° (рис. 84, а) направление тока в витке якоря изменится на обратное, однако полярность щеток, а следовательно, и направление тока во внешней цепи (в нагрузке) останутся неизменными (рис. 84, б). Объясняется это тем, что в тот момент,

когда ток в витке якоря меняет свое направление, происходит смена коллекторных пластин под щетками. Таким образом, под щеткой A всегда находится пластина, соединенная с проводником, расположенным под северным магнитным полюсом, а под щеткой B — пластина, соединенная с проводником, расположенным под южным полюсом. Благодаря этому полярность щеток генератора остается неизменной независимо от положения витка якоря. Что же касается пульсаций тока во внешней цепи, то они намного ослабляются при увеличении числа витков в обмотке якоря при их равномерном распределении по поверхности якоря и соответствующем увеличении числа пластин в коллекторе.

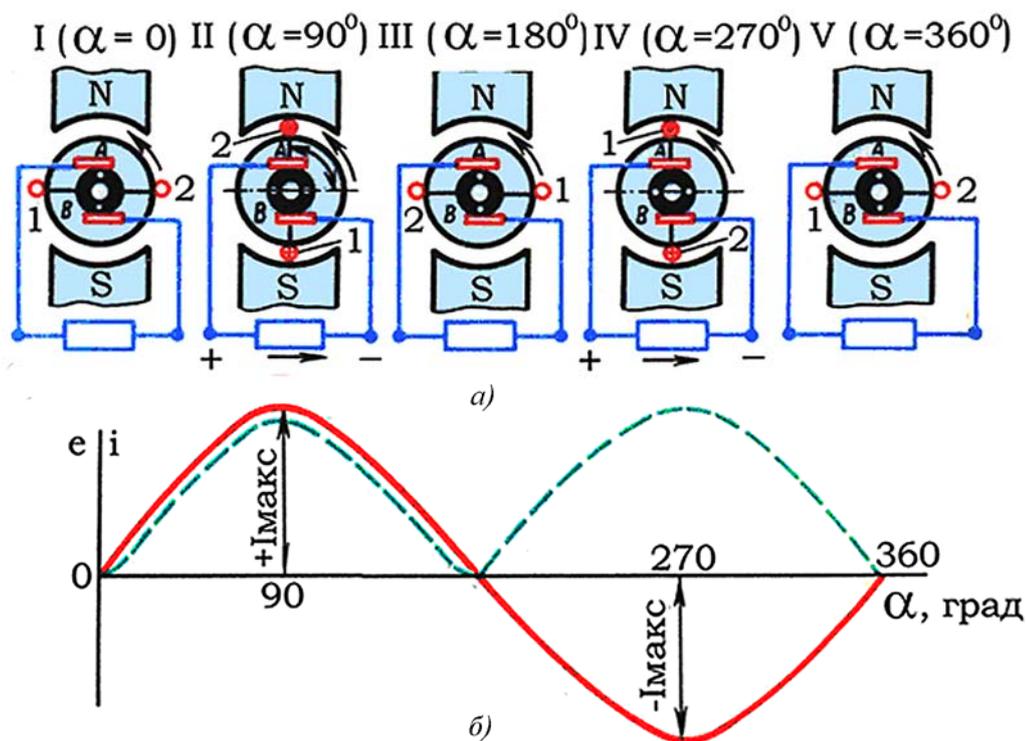


Рис. 84. К принципу действия генератора постоянного тока:
 — ЭДС и ток в обмотке якоря;
 - - - - - ЭДС и ток во внешней цепи генератора

В соответствии с принципом обратимости электрических машин упрощенная модель машины постоянного тока может быть использована в качестве двигателя постоянного тока. Для этого необходимо отключить нагрузку генератора R и подвести к щеткам машины напряжение от источника постоянного тока. Например, если к щетке A подключить зажим «плюс», а к щетке B «минус», то в обмотке якоря появится ток I , направление которого показано на рис. 85. В результате взаимодействия этого тока с магнитным полем постоянного магнита (полем возбуждения) появятся электромагнитные силы $F_{эм}$, создающие на якоре электромагнитный момент M и вращающие его против часовой

стрелки. После поворота якоря на 180° электромагнитные силы не изменят своего направления, так как одновременно с переходом каждого проводника обмотки якоря из зоны одного магнитного полюса в зону другого полюса в этих проводниках меняется направление тока.

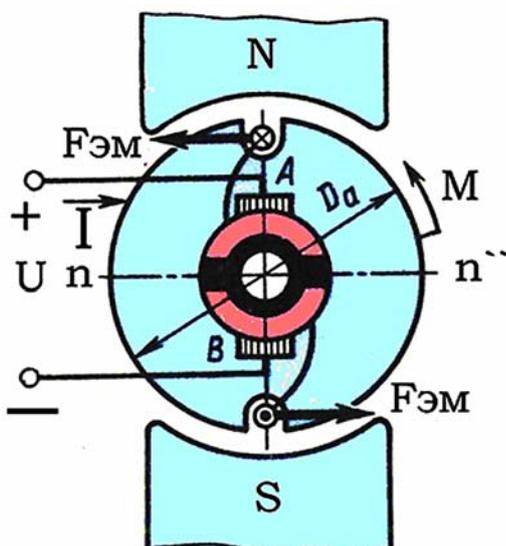


Рис. 85. К принципу действия двигателя постоянного тока

Таким образом, назначение коллектора и щеток в двигателе постоянного тока — изменять направление тока в проводниках обмотки якоря при их переходе из зоны магнитного полюса одной полярности в зону полюса другой полярности.

Рассмотренная упрощенная модель машины постоянного тока не обеспечивает двигателю устойчивой работы, так как при прохождении проводниками обмотки якоря геометрической нейтральной оси nn' (см. рис. 85) электромагнитные силы $F_{эм} = 0$ (магнитная индукция в середине межполюсного пространства равна нулю). Однако с увеличением числа проводников в обмотке якоря (при равномерном их распределении на поверхности якоря) и числа пластин коллектора вращение якоря двигателя становится устойчивым и равномерным.

4.3. Устройство коллекторной машины постоянного тока

В настоящее время электромашиностроительные заводы изготавливают электрические машины постоянного тока, предназначенные для работы в самых различных отраслях промышленности, поэтому отдельные узлы этих машин могут иметь разную конструкцию, но общая конструктивная схема машин одинакова. Неподвижная часть машины постоянного тока называется статором, вращающаяся часть — якорем (рис. 86).

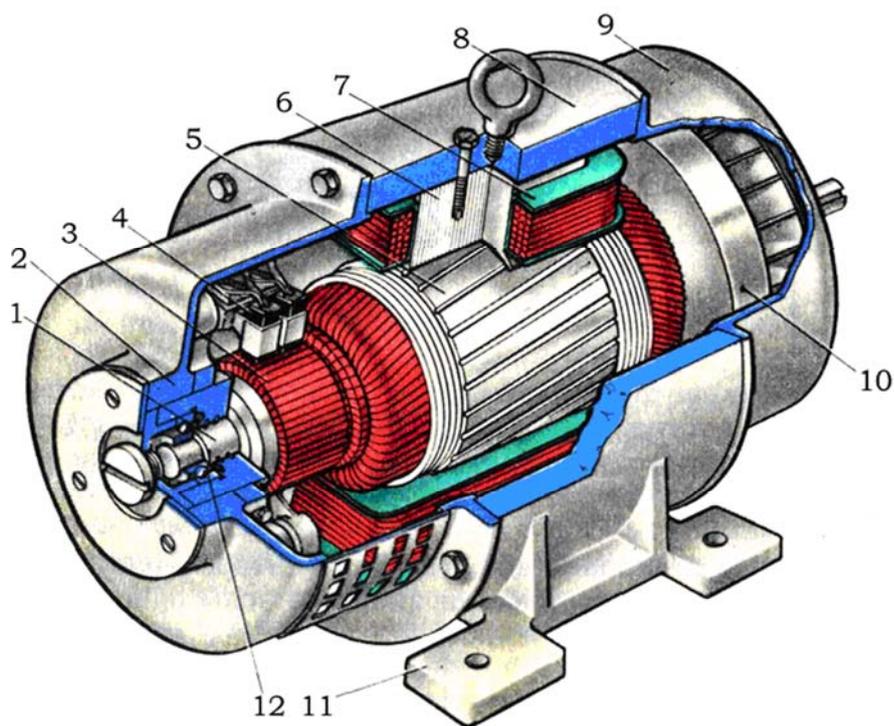


Рис. 85. Устройство машины постоянного тока

Статор. Состоит из станины 8 и главных полюсов 6. Станина служит для крепления полюсов и подшипниковых щитов и является частью магнитопровода, так как через нее замыкается магнитный поток машины. Станину изготавливают из стали — материала, обладающего достаточной механической прочностью и большой магнитной проницаемостью.

В нижней части станины имеются лапы 11 для крепления машины к фундаментальной плите, а по окружности станины расположены отверстия для крепления сердечников главных полюсов 6. Обычно станину делают цельной из стальной трубы либо сварной из листовой стали, за исключением машин с весьма большим наружным диаметром, у которых станину делают разъемной, что облегчает транспортировку и монтаж машины.

Главные полюсы предназначены для создания в машине магнитного поля возбуждения. Главный полюс состоит из сердечника 6 и полюсной катушки 7. Со стороны, обращенной к якорю, сердечник полюса имеет полюсный наконечник, который обеспечивает необходимое распределение магнитной индукции в зазоре машины. Сердечники главных полюсов делают шихтованными из листовой конструкционной стали толщиной 1-2 мм или из тонколистовой электротехнической анизотропной холоднокатаной стали, например марки 3411. Штампованные пластины главных полюсов специально не изолируют, так как тонкая пленка окисла на их поверхности достаточна для значительного ослабления вихревых токов, наведенных в полюсных наконечниках пульсациями магнитного потока, вызванного зубчатостью сердечника якоря.

Анизотропная сталь обладает повышенной магнитной проницаемостью вдоль проката, что должно учитываться при штамповке пластин и их сборке в пакет. Пониженная магнитная проницаемость поперек проката способствует ослаблению реакции якоря и уменьшению потока рассеяния главных и добавочных полюсов.

В машинах постоянного тока небольшой мощности полюсные катушки делают бескаркасными — намоткой медного обмоточного провода непосредственно на сердечник полюса, предварительно наложив на него изоляционную прокладку (рис. 87, а). В большинстве машин (мощностью 1 кВт и более) полюсную катушку делают каркасной: обмоточный провод наматывают на каркас (обычно пластмассовый), а затем надевают на сердечник полюса (рис. 87, б). В некоторых конструкциях машин полюсную катушку для более интенсивного охлаждения разделяют по высоте на части, между которыми оставляют вентиляционные каналы.

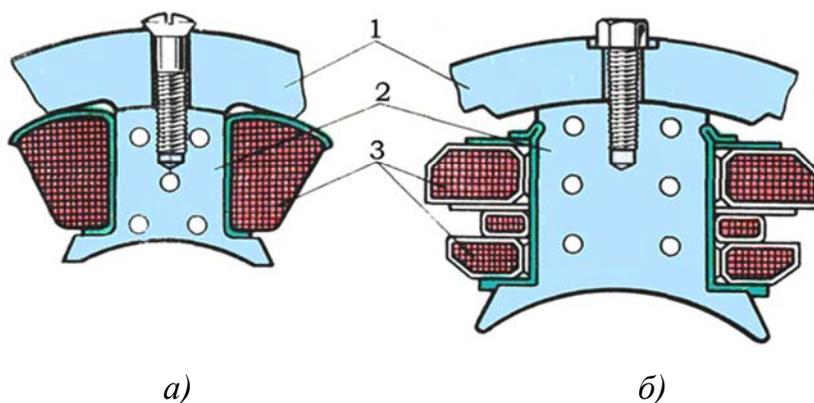


Рис. 87. Главные полюсы с бескаркасной (а) и каркасной (б) полюсными катушками: 1 — станина; 2 — сердечник полюса; 3 — полюсная катушка

Якорь. Якорь машины постоянного тока (см. рис. 86) состоит из вала 1, сердечника 5 с обмоткой и коллектора 3.

Сердечник якоря имеет шихтованную конструкцию и набирается из штампованных пластин тонколистовой электротехнической стали. Листы покрывают изоляционным лаком, собирают в пакет и запекают. Готовый сердечник напрессовывают на вал якоря. Такая конструкция сердечника якоря позволяет значительно ослабить в нем вихревые токи, возникающие в результате его перемагничивания в процессе вращения в магнитном поле. На поверхности сердечника якоря имеются продольные пазы, в которые укладывают обмотку якоря.

Обмотку выполняют медным проводом круглого или прямоугольного сечения. Пазы якоря после заполнения их проводами обмотки обычно закрывают клиньями (текстолитовыми или гетинаксовыми). В

некоторых машинах пазы не закрывают клиньями, а накладывают на поверхность якоря бандаж. Бандаж делают из проволоки или стеклоленты с предварительным натягом. Лобовые части обмотки якоря крепят к обмоткодержателям бандажом.

Коллектор 3 является одним из сложных узлов машины постоянного тока. Основными элементами коллектора являются пластины трапецеидального сечения из твердотянутой меди, собранные таким образом, что коллектор приобретает цилиндрическую форму. В зависимости от способа закрепления коллекторных пластин различают два основных типа коллекторов: со стальными конусными шайбами и на пластмассе. На рис. 88, а показано устройство коллектора со стальными конусными шайбами. Нижняя часть коллекторных пластин 6 имеет форму «ласточкина хвоста».

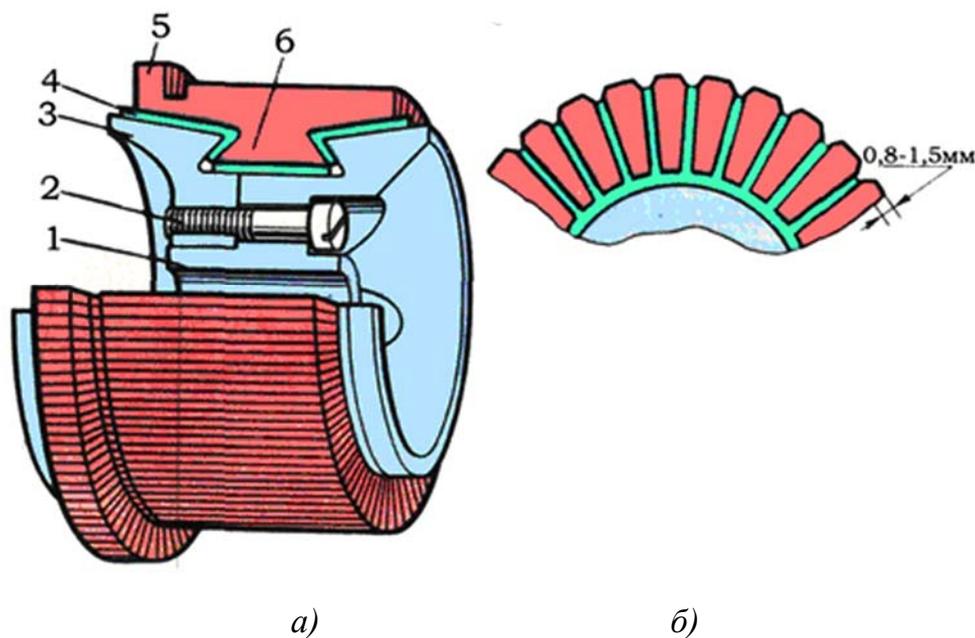


Рис. 88. Устройство коллектора с конусными шайбами:
а — общий вид; б — торцевой разрез

После сборки коллектора эти части пластин оказываются зажатыми между стальными шайбами 1 и 3, изолированными от медных пластин миканитовыми манжетами 4. Конусные шайбы стянуты винтами 2. Между медными пластинами расположены миканитовые изоляционные прокладки. В процессе работы машины рабочая поверхность коллектора постепенно истирается щетками. Чтобы при этом миканитовые прокладки не выступали над рабочей поверхностью коллектора, что вызвало бы вибрацию щеток и нарушение работы машины, между коллекторными пластинами фрезеруют пазы (дорожки) на глубину до 1,5 мм

(рис. 88, б). Верхняя часть 5 коллекторных пластин (см. рис. 88, а), называемая *петушком*, имеет узкий продольный паз, в который закладывают проводники обмотки якоря и тщательно припаивают.

В машинах постоянного тока малой мощности часто применяют *коллекторы на пластмассе*, отличающиеся простотой в изготовлении. Набор медных и миканитовых пластин в таком коллекторе удерживается пластмассой, запрессованной в пространство между набором пластин и стальной втулкой и образующей корпус коллектора. Иногда с целью увеличения прочности коллектора эту пластмассу 2 армируют стальными кольцами 3 (рис. 89). В этом случае миканитовые прокладки должны иметь размеры большие, чем у медных пластин 1, что исключит замыкание пластин стальными (армирующими) кольцами 3 (4 — стальная втулка).

Щеткодержатель (рис. 90) состоит из обоймы 4, в которую помещают щетку 3, курка 1, представляющего собой откидную деталь, передающую давление пружины 2 на щетку. Щеткодержатель крепят на пальце зажимом 5. Щетка снабжается гибким тросиком 6 для включения ее в электрическую цепь машины. Все щеткодержатели одной полярности соединены между собой сборными шинами, подключенными к выводам машины. Одно из основных условий бесперебойной работы машины — плотный и надежный контакт между щеткой и коллектором. Давление на щетку должно быть отрегулировано, так как чрезмерный нажим может вызвать преждевременный износ щетки и перегрев коллектора, а недостаточный нажим — искрение на коллекторе.

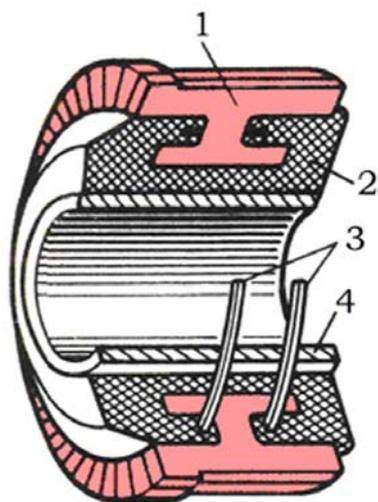


Рис. 89. Устройство коллектора на пластмассе

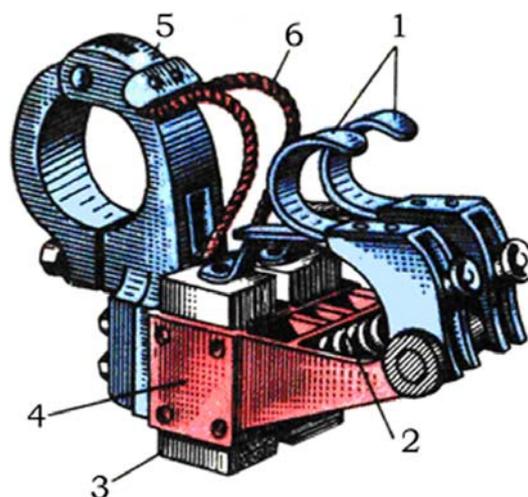


Рис. 90. Щеткодержатель (сдвоенный) машины постоянного тока

Электрический контакт с коллектором осуществляется посредством щеток, располагаемых в щеткодержателях 4 (см. рис. 90).

Помимо указанных частей машина постоянного тока имеет два подшипниковых щита: передний 2 (со стороны коллектора) и задний 9 (см. рис. 85). В центральной части щита имеется расточка под подшипник 12. На переднем подшипниковом щите имеется смотровое окно (люк) с крышкой, через которое можно осмотреть коллектор и щетки не разбирая машины. Концы обмоток выведены на зажимы коробки выводов. Вентилятор 10 служит для самовентиляции машины: воздух поступает в машину обычно со стороны коллектора, омывает нагретые части (коллектор, обмотки и сердечники) и выбрасывается с противоположной стороны через решетку.

Из рассмотрения принципа действия и устройства коллекторной машины постоянного тока следует, что неизменным элементом этой машины, включенным между обмоткой якоря и внешней сетью, является щеточно-коллекторный узел — механический преобразователь рода тока. Таким образом, коллекторные машины сложнее бесколлекторных машин переменного тока (асинхронной и синхронной) и, следовательно, уступают им (особенно асинхронной машине) в надежности и имеют более высокую стоимость.

4.4. Способы возбуждения машин постоянного тока

Для работы электрической машины необходимо наличие магнитного поля. В большинстве машин постоянного тока это поле создается обмоткой возбуждения, питаемой постоянным током. Свойства машин постоянного тока в значительной степени определяются способом включения обмотки возбуждения, т.е. способом возбуждения.

По способам возбуждения машины постоянного тока можно классифицировать следующим образом:

- машины независимого возбуждения, в которых обмотка возбуждения (ОВ) питается постоянным током от источника, электрически не связанного с обмоткой якоря (рис. 91, а);
- машины параллельного (шунтового) возбуждения, в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены параллельно (рис. 91, б);
- машины последовательного (серийного) возбуждения, в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены последовательно (рис. 91, в);
- машины смешанного (компаундного) возбуждения, в которых имеются две обмотки возбуждения — параллельная ОВ1 и последовательная ОВ2 (рис. 91, г);
- машины с возбуждением постоянными магнитами (рис. 91, д).

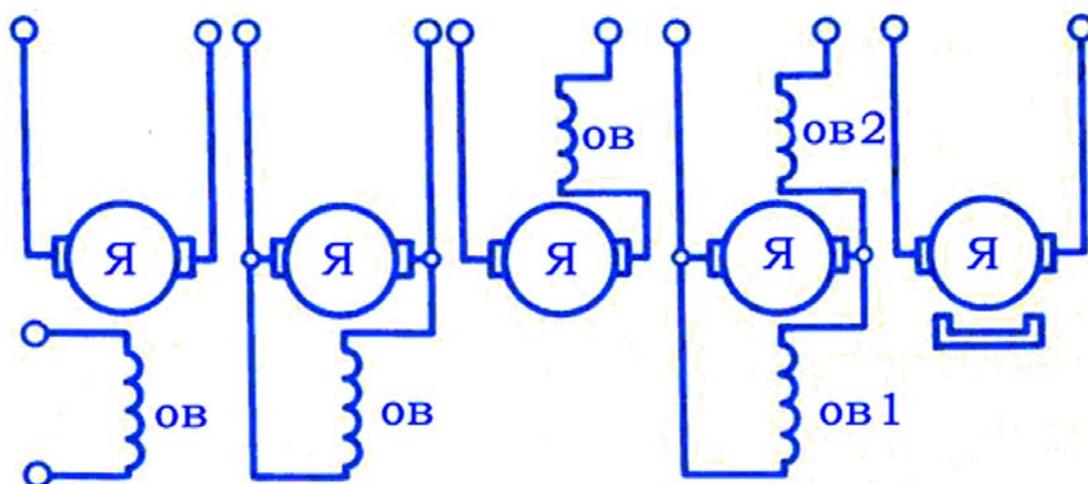


Рис. 91. Способы возбуждения машин постоянного тока

Все указанные машины (кроме последних) относятся к машинам с электромагнитным возбуждением, так как магнитное поле в них создается электрическим током, проходящим в обмотке возбуждения.

Начала и концы обмоток машин постоянного тока согласно ГОСТ обозначаются: обмотка якоря — $Я_1$ и $Я_2$, обмотка добавочных полюсов — $Д_1$ и $Д_2$, компенсационная обмотка — $К_1$ и $К_2$, обмотка возбуждения независимая — $М_1$ и $М_2$ либо $Ш_1$ и $Ш_2$, обмотка возбуждения парольная (шунтовая) — $Ш_1$ и $Ш_2$, обмотка возбуждения последовательная (серийная) — $С_1$ и $С_2$.

4.5. Причины, вызывающие искрение на коллекторе

При работе машины постоянного тока щетки и коллектор образуют скользящий контакт. Площадь контакта щетки выбирают по значению рабочего тока машины, приходящегося на одну щетку, в соответствии с допустимой плотностью тока для выбранной марки щеток. Если по какой-то причине щетка прилегает к коллектору не всей поверхностью, то возникают чрезмерные местные плотности тока, приводящие к искрению на коллекторе. Причины, вызывающие искрение на коллекторе, разделяют на механические, потенциальные и коммутационные.

Механические причины искрения — слабое давление щеток на коллектор, биение коллектора, его эллиптичность или негладкая поверхность, загрязнение поверхности коллектора, выступание миканитовой изоляции над медными пластинами, неплотное закрепление траверсы, пальцев или щеткодержателей, а также другие причины, вызывающие нарушение электрического контакта между щеткой и коллектором.

Потенциальные причины искрения появляются при возникновении напряжения между смежными коллекторными пластинами, превышающего допустимое значение. В этом случае искрение наиболее опасно, так как оно обычно сопровождается появлением на коллекторе электрических дуг.

Коммутационные причины искрения создаются физическими процессами, происходящими в машине при переходе секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую.

Иногда искрение вызывается целым комплексом причин. Выяснение причин искрения следует начинать с механических, так как их обнаруживают осмотром коллектора и щеточного устройства. Труднее обнаружить и устранить коммутационные причины искрения.

При выпуске готовой машины с завода в ней настраивают темную коммутацию, исключаящую какое-либо искрение. Однако в процессе эксплуатации машины, по мере износа коллектора и щеток, возможно появление искрения. В некоторых случаях оно может быть значительным и опасным, тогда машину необходимо остановить для выяснения и устранения причин искрения. Однако небольшое искрение в машинах общего назначения обычно допустимо.

Согласно ГОСТ, искрение на коллекторе оценивается степенью искрения (классом коммутации) под сбегающим краем щетки.

Степень 1 — искрения нет (темная коммутация).

Степень $1\frac{1}{4}$ — слабое искрение под небольшой частью щетки, не вызывающее почернения коллектора и появления нагара на щетках.

Степень $1\frac{1}{2}$ — слабое искрение под большей частью щетки, приводящее к появлению следов почернения на коллекторе, легко устраняемого протиранием поверхности коллектора бензином, и следов нагара на щетках.

Степень 2 — искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и при перегрузке. Приводит к появлению следов почернения на коллекторе, не устраняемых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках.

Степень 3 — значительное искрение под всем краем щетки с появлением крупных вылетающих искр, приводящее к значительному почернению коллектора, не устраняемое протиранием поверхности коллектора бензином, а также к подгару и разрушению щеток. Допускается только для моментов прямого (безреостатного) включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы.

Если допустимая степень искрения в паспорте электрической машины не указана, то при номинальной нагрузке она не должна превышать $1\frac{1}{2}$.

При вращении якоря машины постоянного тока коллекторные пластины поочередно вступают в соприкосновение со щетками. При этом переход щетки с одной пластины (сбегающей) на другую (набегающую) сопровождается переключением секции обмотки из одной параллельной ветви в другую и изменением как значения, так и направления тока в этой секции. Процесс переключения секции из одной параллельной ветви в другую и сопровождающие его явления называются коммутацией.

Секция, в которой происходит коммутация, называется *коммутирующей*, а продолжительность процесса коммутации — *периодом коммутации*:

$$T_K = \frac{60b_{щ}}{K_n b_K},$$

где $b_{щ}$ — ширина щетки;

K — число коллекторных пластин;

n — частота вращения якоря, об/мин;

b_K — расстояние между серединами соседних коллекторных пластин (коллекторное деление).

Сложность процессов коммутации не позволяет рассмотреть коммутацию в общем виде. Поэтому для получения аналитических и графических зависимостей, поясняющих коммутацию, допускают, что ширина щетки равна коллекторному делению; щетки расположены на геометрической нейтрали; электрическое сопротивление коммутирующей секции и мест ее присоединения к коллектору по сравнению с сопротивлением переходного контакта «щетka – коллектор» пренебрежимо мало (обычно такое соотношение указанных сопротивлений соответствует действительности).

В начальный момент коммутации (рис. 92, а) контактная поверхность щетки касается только пластины 1, а коммутирующая секция относится к левой параллельной ветви обмотки и ток в ней равен i_a .

Затем пластина 1 постепенно сбегаёт со щетки и на смену ей набегаёт пластина 2. В результате коммутирующая секция оказывается замкнутой щеткой и ток в ней постепенно уменьшается. В середине процесса коммутации ($t = 0,5T_K$) бесконтактная поверхность щетки равномерно перекрывает обе коллекторные пластины (рис. 92, б). В конце коммутации ($t = T_K$) щетка полностью переходит на пластину 2 и теряет контакт с пластиной 1 (рис. 92, в), а ток в коммутирующей секции становится равным — i_a , т.е. по значению таким же, что и в начале коммутации, а по направлению — противоположным. При этом коммутирующая секция оказалась в правой параллельной ветви обмотки.

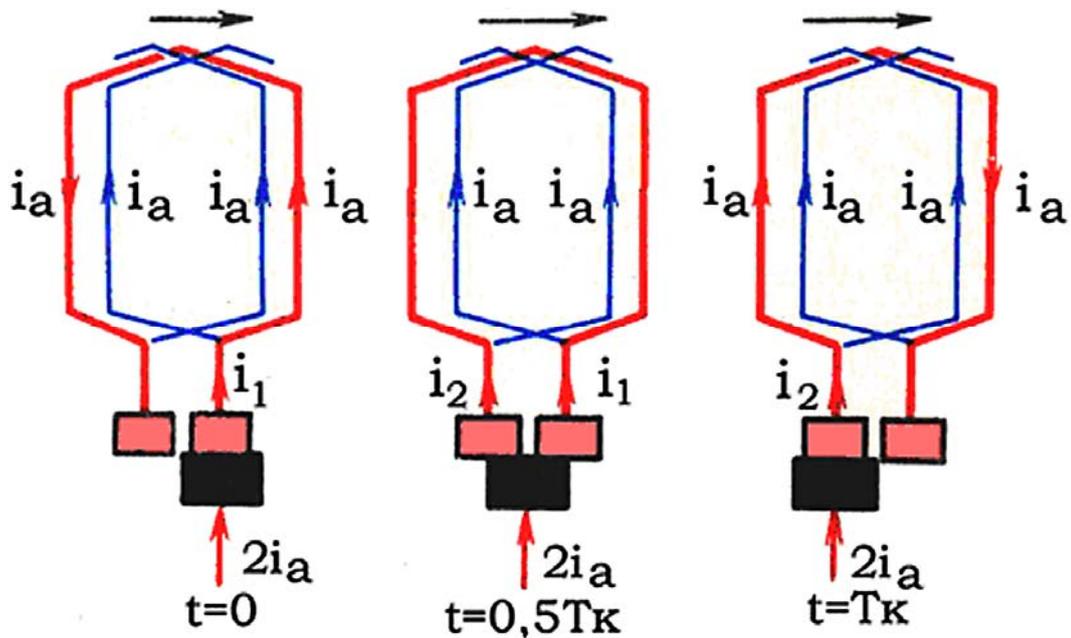


Рис. 92. Переход коммутирующей секции из одной параллельной ветви в другую

4.6. Круговой огонь по коллектору

При значительных перегрузках или внезапном коротком замыкании машины постоянного тока коммутация приобретает резко замедленный характер. В этом случае между сбегающей коллекторной пластиной и сбегающим краем щетки возникает электрическая дуга. Так как коллектор вращается, то дуга механически растягивается (рис. 93, а).

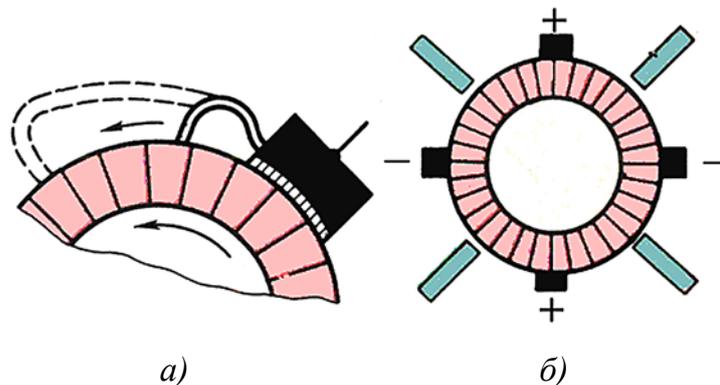


Рис. 93. Растяжение электрической дуги на вращающемся коллекторе (а) и расположение барьеров между щетками (б)

Наряду с этим перегрузка машины сопровождается усилением реакции якоря, под действием которой распределение индукции в воздушном зазоре машины становится неравномерным. В результате напряжение между соседними коллекторными пластинами увеличивается, превышая допустимые пределы. Это, с одной стороны, может привести

к возникновению электрических дуг между смежными пластинами, а с другой стороны, появление высокого потенциала на некоторых пластинах вызывает резкое повышение напряжения между щеткой и коллекторными пластинами по мере их удаления от сбегającego края щетки. Все это создает условия для возникновения электрической дуги между щеткой и коллекторными пластинами.

Таким образом, в условиях значительной перегрузки в машине постоянного тока появляются коммутационные и потенциальные причины для возникновения электрической дуги на коллекторе. При этом электрические дуги, вызванные коммутационными причинами, сливаются с дугами, вызванными потенциальными причинами, образуя вокруг коллектора мощную электрическую дугу, которая может перекинуться также и на корпус машины. Описанное явление называется круговым огнем по коллектору. Круговой огонь очень опасен, так как может привести к тяжелой аварии машины, включая возникновение в машине пожара.

Добавочные полюсы и компенсационная обмотка хотя и ослабляют опасность возникновения кругового огня, но полностью ее не устраняют. Поэтому для защиты обмотки якоря от повреждения электрической дугой в случае возникновения кругового огня в электрических машинах, работающих в условиях частых перегрузок, между коллектором и обмоткой на якоре устанавливают изолирующий экран. В некоторых машинах применяют воздушное дутье, сдувающее дугу в сторону подшипника, защищенного теплостойкой изоляционной перегородкой. Для создания препятствия на пути распространения дуги между щетками разной полярности устанавливают барьеры из изоляционного материала (рис. 93, б).

4.7. Радиопомехи от коллекторных машин и способы их подавления

При неудовлетворительной коммутации коллекторная машина становится источником радиопомех, ухудшающих качество радиоприема, а иногда делающих его невозможным, поэтому уровень промышленных радиопомех не должен превышать значений, определяемых действующими нормами.

Радиопомехи распространяются двумя путями: по эфиру (электромагнитное излучение) и через электросеть. Для подавления помех, распространяемых по эфиру, электрические машины экранируют. В качестве экрана используют заземленный корпус машины. Если со стороны коллектора в машине имеются окна, то их следует закрыть металлическим колпаком или сеткой, обеспечив им надежный контакт с корпусом машины.

Для подавления помех, проникающих от машины в сеть, применяют симметрирование обмоток и включение фильтров. Симметрирование обмоток состоит в том, что каждую обмотку, включенную последовательно в цепь якоря, разделяют на две равные части и присоединяют симметрично к щеткам разной полярности. Применение фильтров — основной способ подавления радиопомех. Для большинства машин достаточно установить емкостный фильтр в виде конденсаторов, включаемых между каждым токонесущим проводом и корпусом машины (рис. 94).

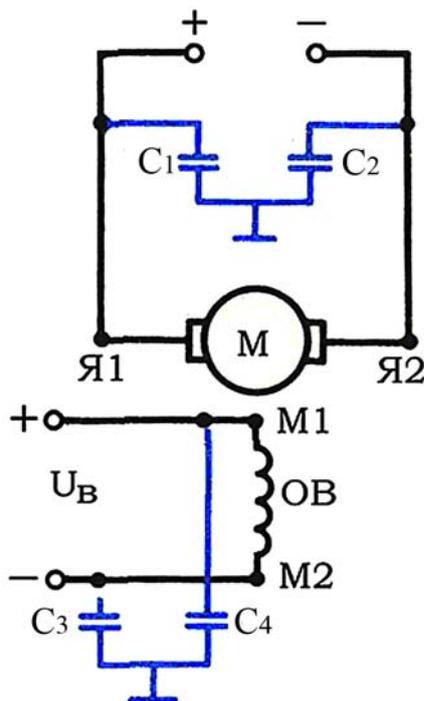


Рис. 94. Схема включения помехозащитного фильтра

Значение емкости конденсаторов подбирают опытным путем, при этом они должны быть рассчитаны на рабочее напряжение машины. Для фильтров предпочтительны проходные конденсаторы типа КБП, у которых одним из зажимов является металлическая оболочка, прикрепляемая непосредственно к корпусу машины.

4.8. Основные понятия коллекторных двигателей

Коллекторные машины обладают свойством обратимости, т.е. они могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Поэтому если машину постоянного тока подключить к источнику энергии постоянного тока, то в обмотке возбуждения и в обмотке якоря машины появятся токи. Взаимодействие тока якоря с полем возбуждения создает на якоре электромагнитный момент M , который является не тормозящим, как это имело место в генераторе, а вращающим.

Под действием электромагнитного момента якоря машина начнет вращаться, т. е. машина будет работать в режиме двигателя, потребляя из сети электрическую энергию и преобразуя ее в механическую. В процессе работы двигателя его якорь вращается в магнитном поле. В обмотке якоря индуцируется ЭДС E_a , направление которой можно определить по правилу «правой руки». По своей природе она не отличается от ЭДС, наводимой в обмотке якоря генератора. В двигателе же ЭДС направлена против тока I_a , и поэтому ее называют противоэлектродвижущей силой (противо-ЭДС) якоря (рис. 95).

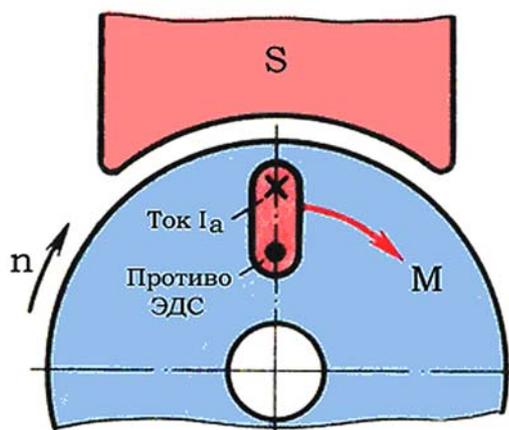


Рис. 95. Направление противо-ЭДС в обмотке якоря двигателя

Для двигателя, работающего с постоянной частотой вращения

$$U = E_a + I_a \Sigma r. \quad (3)$$

Из формулы следует, что подведенное к двигателю напряжение уравнивается противо-ЭДС обмотки якоря и падением напряжения в цепи якоря. На основании формулы ток якоря

$$I_a = \frac{U - E_a}{\Sigma r}.$$

Умножив обе части уравнения (3) на ток якоря I_a , получим уравнение мощности для цепи якоря:

$$U I_a = (I_a)^2 \Sigma r + E_a I_a,$$

где $U I_a$ — мощность в цепи обмотки якоря;

$(I_a)^2 \Sigma r$ — мощность электрических потерь в цепи якоря.

Для выяснения сущности выражения $E_a I_a$ сделаем следующее преобразование:

$$E_a I_a = \frac{pN}{60a} \Phi n I_a = \frac{pN}{60a} \Phi \frac{60\omega}{2\pi} I_a$$

или

$$E_a I_a = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a \omega.$$

Но согласно

$$\left[\frac{pN}{2\pi a} \right] \Phi I_a = M,$$

тогда

$$E_a I_a = M \omega = P_{эм},$$

где $\omega = 2\pi n/60$ — угловая частота вращения якоря;

$P_{эм}$ — электромагнитная мощность двигателя.

Следовательно, выражение $E_a I_a$ представляет собой электромагнитную мощность двигателя. Преобразовав выражение, получим

$$U I_a = M \omega + I_a^2 \Sigma r.$$

Анализ этого уравнения показывает, что с увеличением нагрузки на вал двигателя, т.е. с увеличением электромагнитного момента M , возрастает мощность в цепи обмотки якоря $U I_a$, т.е. мощность на входе двигателя. Но так как напряжение, подводимое к двигателю, поддерживается неизменным ($U = \text{const}$), то увеличение нагрузки двигателя сопровождается ростом тока в обмотке якоря I_a .

В зависимости от способа возбуждения двигателя постоянного тока, так же как и генераторы, разделяют на двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (магнитоэлектрические) и с электромагнитным возбуждением. Последние в соответствии со схемой включения обмотки возбуждения относительно обмотки якоря подразделяют на двигатели параллельного (шунтовые), последовательного (сериесные) и смешанного (компаундные) возбуждения.

В соответствии с формулой ЭДС $E_a = c_e \Phi n$ частота вращения двигателя (об/мин)

$$n = E_a / (c_e \Phi).$$

Подставив значение E_a получим, об/мин:

$$n = \frac{U - I_a \Sigma r}{c_e \Phi},$$

т.е. частота вращения двигателя прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна магнитному потоку возбуждения. Физически это объясняется тем, что повышение напряжения U или уменьшение потока Φ вызывает увеличение разности $(U - E_a)$ это, в свою очередь, ведет к росту тока I_a . Вследствие этого возросший ток повышает вращающий момент, и если при этом нагрузочный момент остается неизменным, то частота вращения двигателя увеличивается.

Из этого следует, что регулировать частоту вращения двигателя можно изменением либо напряжения U , подводимого к двигателю, либо основного магнитного потока Φ , либо электрического сопротивления в цепи якоря.

Направление вращения якоря зависит от направлений магнитного потока возбуждения Φ и тока в обмотке якоря. Поэтому, изменив направление какой-либо из указанных величин, можно изменить направление вращения якоря. Следует иметь в виду, что переключение общих зажимов схемы у рубильника не дает изменения направления вращения якоря, так как при этом одновременно изменяется направление тока и в обмотке якоря, и в обмотке возбуждения.

4.9. Пуск коллекторного двигателя

Ток якоря двигателя определяется формулой. Если принять U и E_r неизменными, то ток I_a зависит от противо-ЭДС E_a . Наибольшего значения ток I_a достигает при пуске двигателя в ход. В начальный момент пуска якорь двигателя неподвижен ($n = 0$) и в его обмотке не индуцируется ЭДС ($E_a = 0$). Поэтому при непосредственном подключении двигателя к сети в обмотке его якоря возникает пусковой ток:

$$I'_a = \frac{U}{E_r}.$$

Обычно сопротивление E_r невелико, поэтому значение пускового тока достигает недопустимо больших значений, в 10-20 раз превышающих номинальный ток двигателя. Такой большой пусковой ток весьма опасен для двигателя. Во-первых, он может вызвать в машине круговой огонь, а во-вторых, при таком токе в двигателе развивается чрезмерно большой пусковой момент, который оказывает ударное действие на вращающиеся части двигателя и может механически их разрушить. И наконец, этот ток вызывает резкое падение напряжения в сети, что неблагоприятно отражается на работе других потребителей, включенных в эту сеть. Поэтому пуск двигателя непосредственным подключением в сеть (безреостатный пуск) обычно применяют для двигателей мощностью не более 0,7-1,0 кВт. В этих двигателях благодаря повышенному сопротивлению обмотки якоря и небольшим вращающимся массам значение пускового тока лишь в 3-5 раз превышает номинальный, что не представляет опасности для двигателя. Что же касается двигателей большей мощности, то при их пуске для ограничения пускового тока используют пусковые реостаты (ПР), включаемые последовательно в цепь якоря (реостатный пуск).

Перед пуском двигателя необходимо рычаг Р реостата поставить на холостой контакт О (рис. 96). Затем включают рубильник, переводят рычаг на первый промежуточный контакт 1 и цепь якоря двигателя оказывается подключенной к сети через наибольшее сопротивление реостата $r_{n.p} = r_1 + r_2 + r_3 + r_4$.

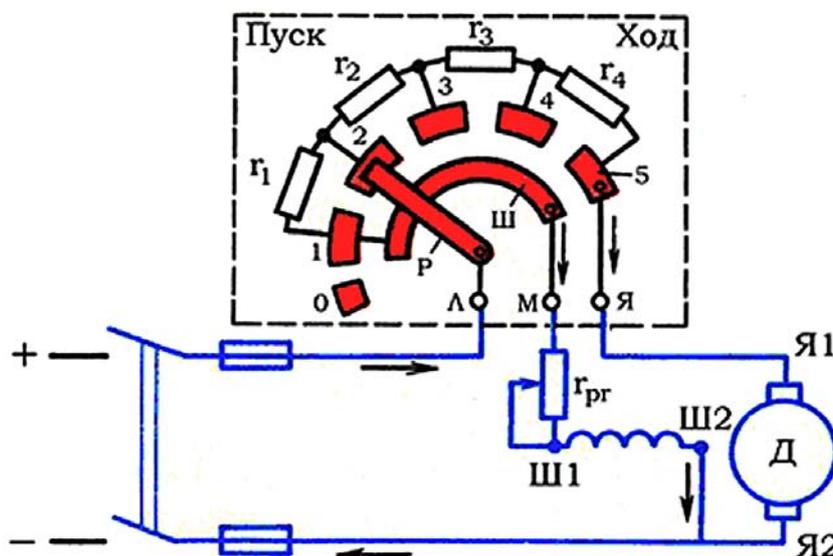


Рис. 95. Схема включения пускового реостата

Одновременно через рычаг Р и шину Ш к сети подключается обмотка возбуждения, ток в которой в течение всего периода пуска не зависит от положения рычага Р, так как сопротивление шины по сравнению с сопротивлением обмотки возбуждения пренебрежимо мало.

Пусковой ток якоря при полном сопротивлении пускового реостата

$$I_n = \frac{U - E_a}{\Sigma r + r_{n.p}}$$

С появлением тока в цепи якоря $I_{n \max}$ возникает пусковой момент $M_{n \max}$, под действием которого начинается вращение якоря. По мере нарастания частоты вращения увеличивается противо-ЭДС $E_a = c_e \Phi n$, что ведет к уменьшению пускового тока и пускового момента.

По мере разгона якоря двигателя рычаг пускового реостата переключают в положения 2, 3 и т.д. В положении 5 рычага реостата пуск двигателя заканчивается ($r_{n.p} = 0$). Сопротивление пускового реостата выбирают обычно таким, чтобы наибольший пусковой ток превышал номинальный не более чем в 2-3 раза.

Так как вращающий момент двигателя M прямо пропорционален потоку Φ , то для облегчения пуска двигателя параллельного и смешанного возбуждения сопротивление реостата в цепи возбуждения r_{pe} следует полностью вывести ($r_{pe} = 0$). Поток возбуждения Φ в этом случае получает наибольшее значение и двигатель развивает необходимый вращающий момент при меньшем токе якоря.

Для пуска двигателей большей мощности применять пусковые реостаты нецелесообразно, так как это вызвало бы значительные потери энергии. Кроме того, пусковые реостаты были бы громоздкими. Поэтому в двигателях большой мощности применяют безреостатный пуск двигателя путем понижения напряжения. Примерами этого являются пуск тяговых двигателей электровоза переключением их с последовательного соединения при пуске на параллельное при нормальной работе или пуск двигателя в схеме «генератор – двигатель».

4.10. Универсальные коллекторные двигатели

Назначение и области применения

Однофазные коллекторные двигатели небольших мощностей зачастую изготавливают для работы на постоянном и переменном токах и называют в этом случае универсальными (рис. 97). Универсальные коллекторные двигатели рассчитывают на мощности от 5 до нескольких сотен ватт. Применяют их для привода электрифицированного инструмента, вентиляторов, пылесосов, привода швейных машин и т.п.

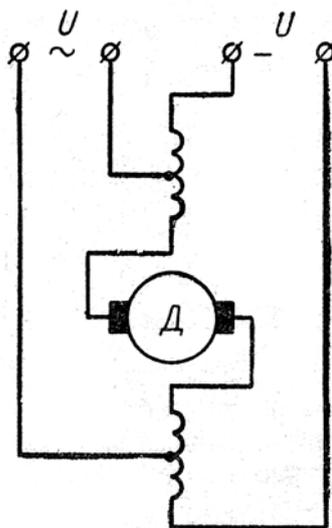


Рис. 97. Схема универсального коллекторного двигателя

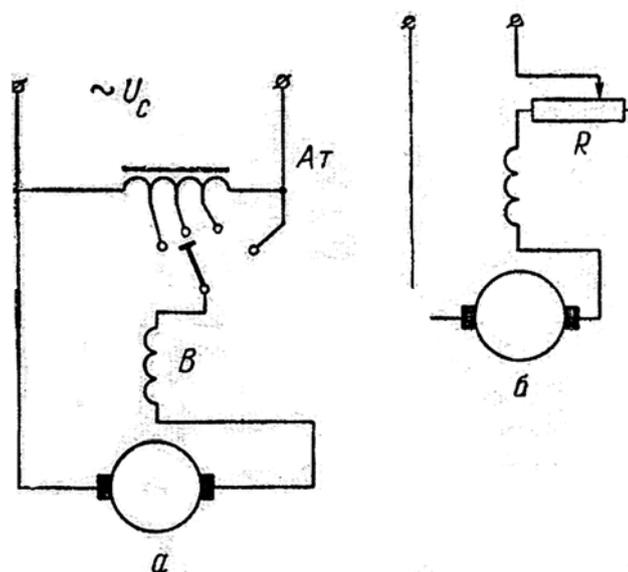
Поскольку сопротивление обмоток двигателя переменному току больше, чем постоянному, то в обмотке возбуждения делают отпайку и при работе на постоянном токе включают всю обмотку возбуждения, а при работе на переменном токе — только часть ее. При этом как на переменном, так и на постоянном токе двигатель развивает почти одинаковый вращающий момент.

Для изменения направления вращения обычно изменяют направление тока в якоре.

Широкое применение в машинах бытового назначения нашли двигатели УВ, УДМ, М-1Д, ЭП, УД, ЗПС, Д2-03, ЭПП-1, ЭПМ-2, ЭПТ-2, УКМ, ЭДБ и другие.

Пуск в ход и регулирование скорости коллекторных двигателей

Однофазные коллекторные двигатели небольших мощностей пускают в ход прямым включением в сеть. Двигатели больших мощностей пускают в ход, понижая автотрансформаторами AT (рис. 98, *а*) напряжение сети. Скорость этих двигателей регулируют, изменяя подводимое от сети напряжение тем же автотрансформатором, а у двигателей небольшой мощности — реостатом R , как, например, у двигателей для привода швейных машин (рис. 98, *б*).



*Рис. 98. Схема пуска однофазных
универсальных коллекторных двигателей:
а — автотрансформатором; б — реостатом*

Кроме того, скорость однофазных коллекторных двигателей можно регулировать теми же способами, что и двигателей последовательного возбуждения постоянного тока.

К недостаткам однофазных коллекторных двигателей следует отнести тяжелые условия пуска и тяжелые условия коммутации, поскольку в короткозамкнутых коммутируемых секциях, кроме реактивной Э.д.с., индуцируется еще и трансформаторная Э.д.с., что приводит к сильному искрению под щетками.

Несмотря на эти недостатки, однофазные коллекторные двигатели часто применяются в быту и на производстве, так как они допускают регулирование скорости в широких пределах.

Однофазный коллекторный двигатель нельзя пускать в ход при малой нагрузке, потому что он может пойти «вразнос», как и двигатель постоянного тока последовательного возбуждения.

Контрольные вопросы к разделу 4

1. Каково назначение коллектора в генераторе и двигателе?
2. Почему станину машины делают из стали?
3. Зачем в коллекторе на пластмассе применяют армирующие кольца?
4. Какие причины могут вызвать искрение на коллекторе?
5. Какие степени искрения предусмотрены классификацией?
6. Почему прямолинейная коммутация не сопровождается искрением?
7. Какие причины, вызывающие искрение, возникают при замедленной коммутации?
8. Объясните назначение и устройство добавочных полюсов?
9. Какие причины способны вызвать огонь по коллектору?
10. Как можно снизить уровень радиопомех в коллекторной машине?
11. Какие электрические машины называются коллекторными?
12. Каково основное назначение коллектора в машине постоянного тока?
13. Какие способы возбуждения применяются в коллекторных машинах постоянного тока?
14. Какая обмотка коллекторной машины называется простой петлевой?
15. Что называется реакцией якоря, и какое вредное влияние она оказывает на работу всей машины?
16. Какие требования предъявляются к обмоткам якоря?
17. От чего зависит направление вращения якоря двигателя постоянного тока?
18. По какой формуле определяется ЭДС машины постоянного тока?
19. Что называется коммутацией и каковы ее виды?
20. Какая обмотка коллекторной машины называется волновой?
21. Что представляет собой сложная петлевая обмотка?
22. Что представляет собой последовательно-параллельная обмотка коллекторной машины?
23. К чему приводит неравномерная нагрузка параллельных ветвей?

24. По какой формуле определяется электромагнитный момент машины постоянного тока?
25. Каковы причины искрения в коллекторе?
26. Как классифицируются коллекторные генераторы постоянного тока?
27. Что представляет собой характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения?
28. Как классифицируются коллекторные двигатели постоянного тока?
29. Какая часть коллектора называется петушком?
30. Какие достоинства и недостатки графитных щеток в электрических машинах переменного и постоянного тока?

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ

1. Опишите устройство и рабочий процесс однофазного трансформатора. Режимы работы.
2. Как классифицируются трансформаторы?
3. Напишите уравнения ЭДС и токов трансформатора.
4. Как рассчитываются потери мощности и КПД трансформатора?
5. Каков физический смысл трансформирования трехфазного тока. Способы трансформирования. Трехфазный трансформатор.
6. Опишите схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора.
7. Поясните группы соединения трансформаторов.
8. Назовите условия включения трансформаторов на параллельную работу.
9. Опишите устройство и особенности рабочего процесса автотрансформаторов.
10. Опишите устройство и особенности работы трехобмоточных трансформаторов.
11. Поясните схему замещения трансформатора.
12. Поясните внешнюю характеристику трансформатора. Назовите методы регулирования напряжения трансформатора.
13. Какие бывают трансформаторы специального назначения?
14. Опишите устройство и принцип действия трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Поясните понятие о скольжении.
15. Опишите устройство и принцип действия трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором.
16. Какие бывают режимы работы асинхронных машин?
17. Приведите паспортные данные трехфазного асинхронного двигателя.
18. Какие существуют способы соединения обмоток статора асинхронных машин.
19. Назовите основные типы обмоток статора трехфазного асинхронного двигателя и принципы их выполнения.
20. Напишите уравнения ЭДС асинхронного двигателя.
21. Напишите уравнения МДС и токов асинхронного двигателя.
22. Что такое электромагнитный момент асинхронного двигателя? Нарисуйте механическую характеристику асинхронной машины и ее основные точки. Что такое перегрузочная способность.
23. Опишите рабочие характеристики асинхронного двигателя. Как определяются потери мощности и КПД.
24. Приведите способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей.

25. Какие бывают способы пуска асинхронных двигателей?
26. Как осуществляется включение трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть.
27. Опишите устройство синхронных машин. Назовите способы возбуждения.
28. Опишите устройство и принцип действия синхронного генератора.
29. Опишите характеристики синхронного генератора: холостого хода, короткого замыкания, регулировочные.
30. Как определяются потери мощности и КПД синхронного генератора?
31. Назовите условия включения синхронных генераторов на параллельную работу.
32. Опишите устройство и принцип действия трехфазного синхронного двигателя.
33. Опишите устройство коллекторной машины постоянного тока.
34. Опишите способы возбуждения машин постоянного тока.
35. Поясните реакцию якоря в машине постоянного тока и способы ее устранения.
36. Какие бывают виды обмоток якоря машин постоянного тока. Принцип выполнения обмотки якоря?
37. Какими величинами определяется ЭДС обмотки якоря машины постоянного тока.
38. От чего зависит электромагнитный момент машины постоянного тока.
39. Каковы причины, вызывающие искрение на коллекторе? Поясните понятие о коммутации, ее виды и способы улучшения.
40. Приведите классификацию и краткую характеристику коллекторных генераторов.
41. Опишите генератор независимого возбуждения: устройство, принцип действия, уравнения и характеристики.
42. Опишите генератор параллельного возбуждения. Опишите генератор смешанного возбуждения.
43. Сравните возможные режимы работы машин постоянного тока.
44. Приведите классификацию и краткую характеристику коллекторных двигателей.
45. Опишите двигатель с параллельным возбуждением: устройство, принцип действия, уравнения и характеристики.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ётов, М.С. Лекции по электрическим машинам. — Кострома : КГСХА, 2000.
2. Кацман, М.М. Электрические машины : учеб. для учащихся электротехн. спец. техникумов. — 2 изд., перераб. и доп. — М. : Высшая школа, 1990. — 463 с.
3. Кравчик, А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А : справочник. — М. : Энергоиздат, 1982. — 504 с.
4. Брускин, Д.С. Электрические машины и микромашины : учебник для вузов. — М. : Высшая школа, 1981. — 432 с.
5. Ванурин, В.Н. Электрические машины. — М. : Колос, 1995. — 256 с.
6. Метрология, стандартизация и сертификация / В.Я. Алексеев, В.В. Алексеев, Е.М. Антонюк. — М. : Академия, 2010. — С. 101-104.
7. Кравцов, А.В. Электрические измерения. — М. : Колос, 1999. — С. 109-114, 117-188.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ТЕСТЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Кратность пусковых токов асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором находится в пределах...

- 1) $3,5 \div 8$
- 2) $10 \div 15$
- 3) $15 \div 25$
- 4) $1,5 \div 3,5$

2. При последовательном и согласном соединении обмоток трансформатора их ЭДС...

- 1) вычитаются
- 2) складываются
- 3) умножаются
- 4) делятся

3. К измерительным трансформаторам относятся...

- 1) трансформаторы тока
- 2) трансформаторы частоты
- 3) трансформаторы мощности
- 4) трансформаторы напряжения

4. Коэффициент трансформации трехфазного силового трансформатора определяется отношением

- 1) $U_{\text{лин.ВН}} / U_{\text{лин.НН}}$
- 2) $W_{\text{ВН}} / W_{\text{НН}}$
- 3) $I_{\text{НН}} / I_{\text{ВН}}$
- 4) $U_{\text{фаз.ВН}} / U_{\text{фаз.НН}}$

5. Полная мощность первичной обмотки трехфазного трансформатора определяется по выражению...

- 1) $S_1 = U_1 I_1$
- 2) $S_1 = S_2 K_{\text{тр}}$
- 3) $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi$
- 4) $S_1 = \sqrt{3} U_1 I_1$

6. Т-образная схема замещения трехфазного трансформатора составляется...

- 1) для одной фазы
- 2) для двух фаз
- 3) для трех фаз
- 4) для двух фаз с нулевым проводом

7. Направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле определяется по...

- 1) первому закону Кирхгофа
- 2) правилу правоходового винта
- 3) правилу правой руки
- 4) правилу левой руки

8. Направление ЭДС в проводнике, движущемся в магнитном поле, определяется по...

- 1) закону Ома
- 2) закону Джоуля-Ленца
- 3) правилу правой руки
- 4) правилу левой руки

9. Скорость вращения магнитного поля в электродвигателе типа 4АА56В4У3 равна

- 1) 3 000 об/мин
- 2) 1 500 об/мин
- 3) 1 000 об/мин
- 4) 750 об/мин

10. Обмотка последовательного возбуждения машин постоянного тока называется...

- 1) серийной
- 2) компаундной
- 3) шунтовой
- 4) независимой

11. Внешняя характеристика трансформатора представляет собой соотношение...

- 1) $U_2 = f(U_1)$
- 2) $U_2 = f(\cos \varphi)$
- 3) $U_2 = f(I_2)$
- 4) $U_2 = f(w)$

12. Механическая характеристика асинхронного электродвигателя представляет собой соотношение...

- 1) $M_2 = f(n_2)$
- 2) $M_2 = f(n_1)$
- 3) $M_2 = f(I_1)$
- 4) $M_2 = f(I_2)$

13. Номинальное вторичное напряжение измерительного трансформатора напряжения составляет...

- 1) $U_{2\text{НОМ}} = 24 \text{ В}$
- 2) $U_{2\text{НОМ}} = 100 \text{ В}$
- 3) $U_{2\text{НОМ}} = 220 \text{ В}$
- 4) $U_{2\text{НОМ}} = 380 \text{ В}$

14. Из опыта короткого замыкания трансформатора определяются...

- 1) потери мощности в меди
- 2) потери мощности в стали
- 3) число витков обмоток
- 4) номинальные напряжения обмоток

15. Трансформаторное масло в баке силового трансформатора предназначено для...

- 1) охлаждения активных частей
- 2) увеличения сопротивления изоляции обмоток
- 3) уменьшения шума работы трансформатора
- 4) повышения КПД трансформатора

16. По механической характеристике трехфазного асинхронного двигателя определяется...

- 1) пусковой момент
- 2) средний момент
- 3) минимальный момент
- 4) критический момент

17. Асинхронный двигатель с фазным ротором используется для...

- 1) уменьшения пускового тока
- 2) получения синхронной частоты вращения
- 3) регулирования частоты вращения
- 4) уменьшения нагрева двигателя

18. Частоту вращения трехфазного асинхронного двигателя регулируют...

- 1) изменением частоты тока в сети
- 2) изменением напряжения сети
- 3) шунтированием обмотки
- 4) изменением числа пар полюсов

19. Обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя могут соединяться по схеме...

- 1) звезда
- 2) треугольник
- 3) зигзаг
- 4) звезда с нулем

20. Реверсирование трехфазного асинхронного электродвигателя возможно за счет изменения...

- 1) чередования фаз
- 2) нагрузки
- 3) числа пар полюсов
- 4) частоты подводимого напряжения

21. Частота вращения двигателя постоянного тока регулируется...

- 1) направлением вращения
- 2) сопротивлением в цепи якоря
- 3) магнитным потоком обмотки возбуждения
- 4) напряжением на якоре

22. Из опыта холостого хода трансформатора определяют...

- 1) ток холостого хода I_{xx} (%)
- 2) потери мощности в магнитопроводе $\Delta P_{стали}$
- 3) номинальные напряжения обмоток $U_{1ном}$, $U_{2ном}$
- 4) напряжение короткого замыкания

23. Ограничить пусковой ток двигателя постоянного тока можно за счет...

- 1) увеличения числа витков обмотки возбуждения
- 2) увеличения сопротивления в цепи якоря
- 3) увеличения сопротивления в цепи обмотки возбуждения
- 4) уменьшения сопротивления в цепи обмотки возбуждения

24. Пусковые токи электродвигателя с короткозамкнутым ротором...

- 1) увеличивают потери напряжения в сети
- 2) нагревают обмотки двигателя с большой скоростью
- 3) выводит из строя тепловые реле
- 4) снижают пусковой момент двигателя

25. Реактивный ток $I_{реак}$ асинхронного электродвигателя создает...

- 1) высокий $\cos \varphi$
- 2) магнитный поток
- 3) критический момент
- 4) минимальный момент

26. Для параллельной работы двух трансформаторов необходимо выполнять...

- 1) равенство вторичных и первичных напряжений
- 2) равенство напряжения короткого замыкания
- 3) соблюдение одинаковых систем охлаждения
- 4) соблюдение одинаковых групп соединений обмоток

27. От числа полюсов трехфазного асинхронного двигателя не зависит...

- 1) вращающий момент
- 2) частота вращения
- 3) массогабаритные показатели
- 4) скольжение

28. Вращающий момент трехфазного асинхронного двигателя зависит от...

- 1) величины фазного напряжения
- 2) частоты питающей сети
- 3) направления вращения
- 4) величины фазного тока

29. Соотношение потерь мощности в трансформаторе при номинальной нагрузке...

- 1) $\Delta P_{ст} > \Delta P_{медь}$
- 2) $\Delta P_{кз} > \Delta P_{хх}$
- 3) $\Delta P_{эл} < \Delta P_{маг}$
- 4) $\Delta P_{ст} = \Delta P_{обм}$

30. Зона перегиба характеристики холостого хода трансформатора определяет...

- 1) номинальное первичное напряжение
- 2) напряжение короткого замыкания
- 3) потери мощности в обмотках
- 4) количество витков в обмотках

Учебно-теоретическое издание

Электрические машины : учебное пособие для студентов направлений подготовки 35.03.06 «Агроинженерия», 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» очной и заочной форм обучения / сост. М.С. Ётов. — Караваево : Костромская ГСХА, 2015. — 140 с.

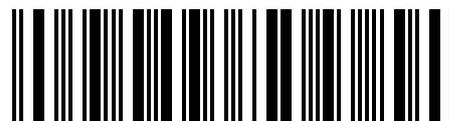
Гл. редактор Н.В. Киселева
Редактор выпуска Т.В. Тарбеева
Корректор Т.В. Кулинич

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Костромская государственная сельскохозяйственная академия" 156530, Костромская обл., Костромской район, пос. Караваево, уч. городок, д. 34, КГСХА

Компьютерный набор. Подписано в печать 10/07/2015.
Заказ №390. Формат 84х60/16. Тираж 100 экз. Усл.
печ. л. 8,64. Бумага офсетная. Отпечатано 12/08/2015.
Цена 74,00 руб.

Отпечатано с готовых оригинал-макетов в академической типографии на цифровом дубликаторе. Качество соответствует предоставленным оригиналам.

Цена 74,00 руб.



2015 * 390