

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
ФГОУ ВО Иркутский государственный аграрный университет
им. А.А. Ежевского

Кафедра электрооборудования и физики

Боннет В.В.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ



Молодежный 2020

УДК 62-83

Б 815

Рекомендовано к изданию Научно-методическим советом Иркутского государственного аграрного университета им. А.А. Ежевского (протокол от декабря 2020 г.)

Рецензенты:

Федчишин В.В. - к.т.н., доцент, директор института энергетики Иркутского национального исследовательского технического университета

Подьячих С.В. - к.т.н., заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники Иркутского ГАУ им. А.А. Ежевского

© Боннет В.В., 2019.

© Иркутский государственный
аграрный университет

имени А.А. Ежевского, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие сведения	4
2. Машины постоянного тока	9
3. Асинхронные электродвигатели	22
4. Синхронные машины	41
5. Трансформаторы	48
6. Выбор электродвигателя по мощности	61
Контрольные вопросы	65
Приложение 1. Элементы систем управления и их условное графическое изображение по ГОСТу.....	66
Приложение 2. Буквенные коды наиболее распространённых видов элементов по ГОСТу.....	70
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	74

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Механические характеристики рабочих машин и электродвигателей

Основное назначение электродвигателя - преобразование электрической энергии в механическую. Эта энергия передается через вал двигателя производственной машине или механизму. При установившейся скорости движения моменты двигателя и статической нагрузки равны $M = M_{cm}$. Момент M_{cm} создаваемый производственным механизмом; зависит от его механических свойств и может быть как постоянным, не зависящим от угловой скорости, так и переменным, в той или иной степени определяемым ею. Такая зависимость, изображаемая прямой или кривой линией в прямоугольной системе координат ω, M , называется *механической характеристикой производственного механизма* и представляется функцией $\omega = f(M_{cm})$.

В свою очередь, момент двигателя, создаваемый взаимодействием магнитного потока и тока в его обмотках, как правило, с изменением значения скорости ротора или якоря изменяется. Это изменение отражается механической характеристикой двигателя $\omega = f(M)$ в системе координат ω, M . На рис.1.2. показаны типичные механические характеристики двигателей переменного (рис.1.2, а) и постоянного (рис.1.2, б) тока.

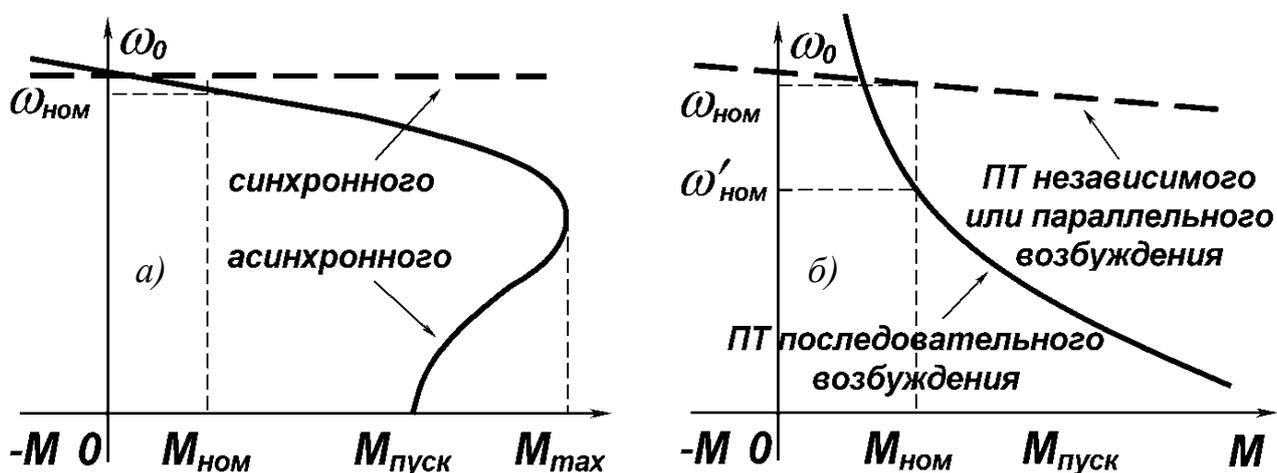


Рисунок 1.2 – Механические характеристики двигателей

Основными величинами, определяющими механическую характеристику двигателя, являются:

1. Начальный пусковой момент $M_{пуск}$ (или момент короткого замыкания M_k), развиваемый двигателем при скорости, равной нулю;

2. Наибольший момент M_{max} , который способен развивать двигатель; у синхронного и асинхронного двигателей переменного тока он ограничен значениями 1,6-3,5 от номинального; у двигателей же постоянного тока он теоретически не ограничен, хотя практически по условиям коммутации тока он ограничивается каталожными значениями, равными 2-8 от номинального. Момент M_{max} , развиваемый асинхронным двигателем при пуске, называется опрокидывающим (или критическим);

3. Скорость идеального холостого хода ω_0 , которую двигатель способен развивать в идеальном случае – при полном отсутствии статического момента на валу и электромагнитном моменте, равном нулю.

В приведенных механических характеристиках двигателей степень изменения момента с изменением скорости различна. Величина, характеризующая это изменение, называется жесткостью механической характеристики $\beta = dM/d\omega$.

В зависимости от степени жесткости механические характеристики разделяют на три вида:

1. Абсолютно жесткая механическая характеристика, при которой угловая скорость двигателя остается неизменной при изменении вращающего момента. Такую характеристику имеют синхронные двигатели. Жесткость этой характеристики $\beta = \infty$;

2. Жесткая механическая характеристика, при которой угловая скорость изменяется незначительно при изменении вращающего момента;

3. Мягкая механическая характеристика, при которой угловая скорость двигателя изменяется значительно при изменении момента.

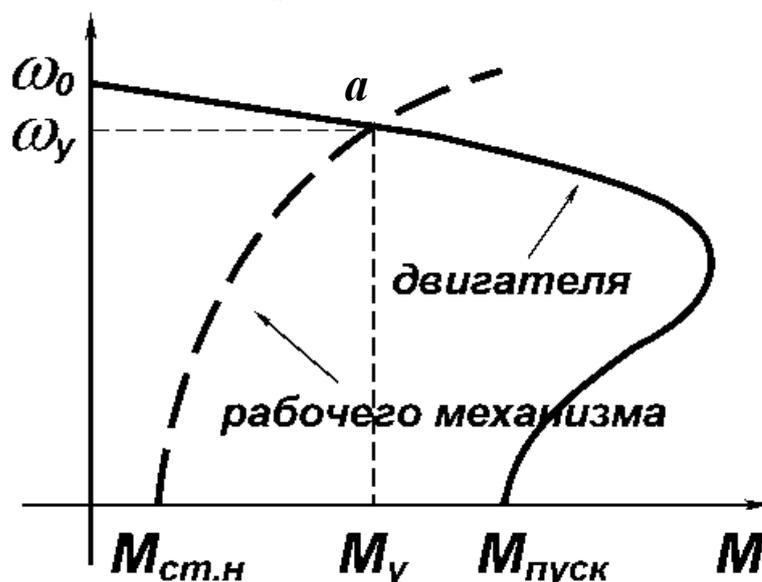


Рисунок 1.3 – Механические характеристики двигателя и рабочего механизма

Так как установившийся режим работы электропривода характеризуется равенством моментов и угловых скоростей двигателя и производственного механизма, то для нахождения этого режима механические характеристики производственного механизма и двигателя изображают в одном квадрате плоскости ω, M рисунок 1.3. Точки пересечения характеристик будут определять установившийся режим M_y, ω_y . Так, например, устойчивая работа вентилятора с приводным асинхронным двигателем будет точка a . Устойчивая работа электропривода будет при выполнении условий $\beta - \beta_{cm} < 0$ или $\beta < \beta_{cm}$, где β и β_{cm} – жесткости характеристик двигателя и производственного механизма.

Для исследования движения электропривода иногда используют результирующую механическую характеристику, представляющую собой сумму механических характеристик двигателя и механизма. Жесткость такой характеристики при различных угловых скоростях различна.

1.2. Классификация электрических машин используемых в электроприводах

Электрические машины классифицируются по назначению, принципу действия, мощности, роду тока, частоте вращения и т.д.

Классификация по назначению. Электрические машины по назначению подразделяют на следующие виды.

Электромашинные генераторы преобразуют механическую энергию в электрическую. Их устанавливают на электрических станциях и различных транспортных установках: автомобилях, самолетах, тепловозах, кораблях, передвижных электростанциях и др. В ряде случаев генераторы используют в качестве источников питания в установках связи, устройствах автоматики, измерительной техники и пр.

Электрические двигатели преобразуют электрическую энергию в механическую: они приводят во вращение различные машины, механизмы и устройства, применяемые в промышленности, сельском хозяйстве, связи, на транспорте, и в быту. В современных системах автоматического управления их используют в качестве исполнительных, регулирующих и программирующих органов.

Электромашинные преобразователи изменяют значения напряжения переменного и постоянного тока, частоту, преобразуют переменный ток в постоянный и, наоборот, число фаз и др. В последнее время электромашинные преобразователи практически не используются вследствие применения полупроводниковых преобразователей.

Электромашинные компенсаторы осуществляют генерирование реак-

тивной мощности в электрических установках для улучшения энергетических показателей источников и приемников электрической энергии.

Электромашинные усилители используют для управления объектами большой мощности посредством электрических сигналов малой мощности, подаваемых на их обмотки управления (возбуждения).

Электрические машины небольшой мощности до 600 Вт называют *микромашинами*. Их широко применяют в автоматических устройствах и в электробытовых приборах. По назначению электрические микромашинные автоматических устройств подразделяются на следующие группы.

Силовые микродвигатели приводят во вращение различные механизмы автоматических устройств, самопишущих приборов и пр.

Управляемые (исполнительные) двигатели преобразуют подводимый к ним электрический сигнал в механическое перемещение вала, т. е. отрабатывают определенные команды.

Тахогенераторы преобразуют механическое вращение вала в электрический сигнал-напряжение, пропорциональное частоте вращения вала.

Вращающиеся трансформаторы дают на выходе напряжение, пропорциональное той или иной функции угла поворота ротора, например синусу или косинусу этого угла или самому углу.

Машины синхронной связи (сельсины, магнесины) осуществляют синхронный и синфазный поворот или вращение нескольких механически не связанных между собой осей.

Микромашинные гироскопических приборов (гироскопические двигатели, датчики угла, датчики момента) осуществляют вращение роторов гироскопов с высокой частотой и коррекцию их положения.

Электромашинные преобразователи и усилители преобразуют энергию. Электрические микромашинные первых двух групп часто называют *силовыми*, а третьей - пятой групп - *информационными*.

Классификация по принципу действия. На рисунке 1.4. представлена диаграмма классификации электрических машин, содержащая основные виды электрических машин, получившие наибольшее применение в современном электроприводе. Согласно этой классификации все электрические машины разделяются на бесколлекторные и коллекторные, различающиеся как принципом действия, так и конструкцией.

Бесколлекторные машины - это машины переменного тока. Они разделяются на асинхронные и синхронные. Асинхронные машины применяются преимущественно в качестве двигателей, а синхронные - как в качестве двигателей, так и в качестве генераторов.



Рисунок 1.3 – Классификация электрических машин

Коллекторные машины в основном применяются для работы на постоянном токе в качестве генераторов или двигателей. Некоторые коллекторные машины небольшой мощности делают универсальными двигателями, способными работать также от сети переменного тока.

Электрические машины могут различаться схемами включения либо другими показателями, влияющими на эксплуатационные свойства этих машин. Например, асинхронные и синхронные машины могут быть трехфазными или однофазными. Асинхронные двигатели в зависимости от конструкции обмотки ротора разделяются на машины с короткозамкнутым ротором и с фазным ротором. Коллекторные машины постоянного тока в зависимости от способа создания в них магнитного поля возбуждения разделяются на машины с постоянными магнитами и обмоткой возбуждения.

Наиболее употребительные номинальные напряжения электрических машин следующие: для двигателей постоянного тока 110, 220 и 440 В, для генераторов постоянного тока 115, 230 и 460 В, для двигателей переменного тока и первичных обмоток трансформаторов 220, 380, 660 В и 3, 6, 10 кВ, для генераторов и вторичных обмоток трансформаторов 230, 400, 690 В и 3,15; 6,3; 10,5; 21 кВ (для вторичных обмоток трансформаторов также 3,3; 6,6; 11 и 22 кВ).

Раздел 2. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.1. Принцип действия генератора и двигателя постоянного тока

Характерным признаком машин постоянного тока 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 электро-механического преобразования энергии.

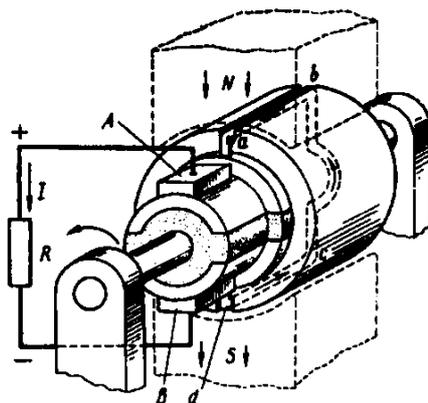


Рисунок 2.1 – Упрощенная модель коллекторной машины

Рассмотрим принцип действия генератора постоянного тока. На рисунке 2.1. 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 .

Предположим, что приводной двигатель вращает якорь генератора против часовой стрелки, тогда в витке на якоре, вращающемся в магнитном поле постоянного магнита, наводится ЭДС, мгновенное значение которой

$$e=2Blv,$$

где B - магнитная индукция в воздушном зазоре между полюсом и якорем в месте расположения проводника; l - активная длина проводника; v - линейная

скорость движения проводника.

В процессе работы генератора якорь вращается и виток $abcd$ занимает разное пространственное положение, поэтому в обмотке якоря наводится переменная ЭДС, так как проводники обмотки якоря проходят попеременно под северным и южным полюсами, в результате чего направление э. д. с. в проводниках меняется. По форме кривая э. д. с. проводника в зависимости от времени t повторяет кривую распределения индукции B вдоль воздушного зазора.

Частота э.д.с. равна произведению p пар полюсов с чередующейся полярностью на скорости вращения якоря n , выраженной в оборотах в секунду $f = pn$.

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 рисунке 2.1, 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° направление тока в витке якоря изменится на обратное, однако полярность щеток, а следовательно, и направление тока во внешней цепи (в нагрузке) останутся неизменными рисунок 2.2.



Рисунок 2.2 – Кривые э.д.с. и тока простейшей машины в якоря и в цепи генератора

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.

Таким образом, в генераторе коллектор является механическим выпрямителем, который преобразовывает переменный ток обмотки якоря в постоянный ток во внешней цепи.

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 доказано на рис. 2.3.

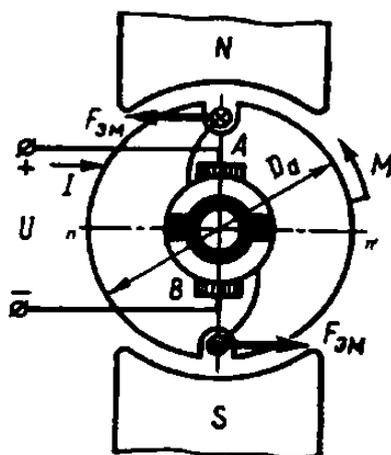


Рисунок 2.3 – К принципу действия двигателя постоянного тока

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.

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' (рис.2.3) электромагнитные силы $F_{эм} = 0$ (магнитная индукция в середине межполюсного пространства равна нулю). Что же касается пульсации 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 вращение якоря двигателя становится устойчивым и равномерным.

2.2. Устройство машины постоянного тока

Общая конструктивная схема машины постоянного тока одинакова, хотя отдельные узлы машин постоянного тока, предназначенных для работы в различных отраслях промышленности могут иметь разную конструкцию. Неподвижная часть машины постоянного тока называется статором, вращающаяся часть – якорем (рис.2.4).

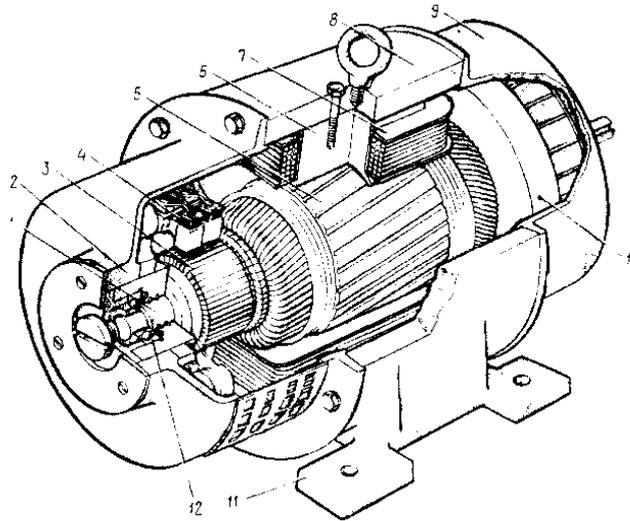


Рисунок 2.4 – Устройство машины постоянного тока

Статор. Состоит из станины 8 и главных полюсов 6. Станина 8 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 рисунок 2.5, а.

В большинстве машин полюсную катушку делают каркасной: обмоточный провод наматывают на каркас (обычно пластмассовый), а затем надевают на сердечник полюса рисунок 2.5,б. В некоторых конструкциях машин полюсную катушку для более интенсивного охлаждения разделяют по высоте на части, между которыми оставляют вентиляционные каналы.

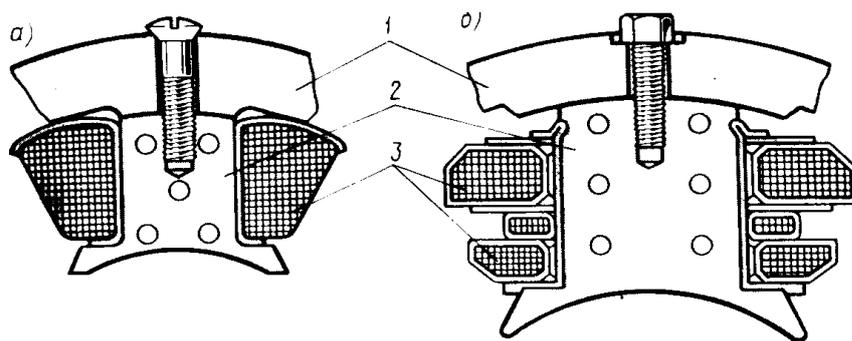


Рисунок 2.5 – Главные полюсы с бескаркасной (а) и каркасной (б) полюсными катушками: 1 - станина; 2 - сердечник полюса; 3 - полюсная катушка.

Якорь. Якорь машины постоянного тока рисунок.2.4 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. Паза якоря после заполнения их проводами обмотки обычно закрывают клиньями (текстолитовыми или гетинаксовыми). В некоторых машинах паза 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.

Щеткодержатель состоит из обоймы, в которую помещают щетку, курка, представляющего собой откидную деталь, передающую давление пружины на щетку. В зависимости от способа изготовления и физических свойств все щетки делят на шесть основных групп: угольно-графитные, графитные, электрографитированные, медно-графитные, бронзо-графитные и серебряно-графитные. в сельском хозяйстве.

2.3. 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 рисунок 2.6, *а*;

- *машины параллельного возбуждения*, в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены параллельно (рис. 2.6, *б*);

- *машины последовательного возбуждения* (обычно применяемые в качестве двигателей), в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены последовательно (рис. 2.6, *в*);

- *машины смешанного возбуждения*, в которых имеются две обмотки возбуждения - параллельная *ОВ1* и последовательная *ОВ2* (рис. 2.6, *г*);

- машины с возбуждением постоянными магнитами (рис. 2.6, д).

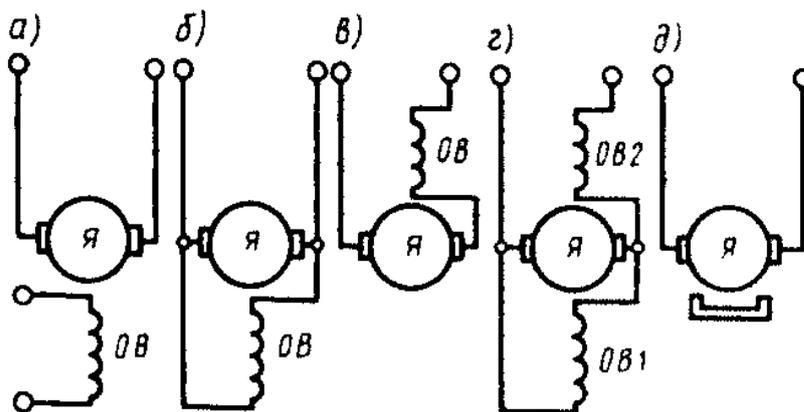


Рисунок 2.6 – Способы возбуждения машин постоянного тока

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 ГОСТу обозначаются: обмотка якоря - $Я1$ и $Я2$, обмотка добавочных полюсов - $Д1$ и $Д2$, компенсационная обмотка - $К1$ и $К2$, обмотка возбуждения независимая - $М1$ и $М2$, обмотка возбуждения параллельная - $Ш1$ и $Ш2$, обмотка возбуждения последовательная - $С1$ и $С2$.

2.4. Пуск двигателя параллельного возбуждения

Значение пускового тока для двигателей постоянного тока может достигать достаточно больших значений, в 10...20 раз превышающих номинальный ток двигателя.

Такой пусковой ток весьма опасен для двигателя:

- он может вызвать в машине круговой огонь;
- при таком токе в двигателе развивается чрезвычайно большой пусковой момент, который оказывает ударное действие на вращающиеся части двигателя и может привести к их механическому разрушению;
- в третьих, этот ток вызывает резкое падение напряжения в сети, что неблагоприятно отражается на работе других потребителей.

Поэтому пуск двигателя непосредственным подключением в сеть 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 номиналь-

ный, что не представляет опасности для двигателя. Для двигателей большей мощности приходится ограничивать пусковой ток.

Для двигателей постоянного тока могут быть применены три способа пуска:

- прямой, при котором обмотка якоря подключается непосредственно к сети;
- реостатный, при котором в цепь якоря включается пусковой реостат для ограничения тока;
- путем плавного повышения питающего напряжения, которое подается на обмотку якоря.

1. Прямой пуск.

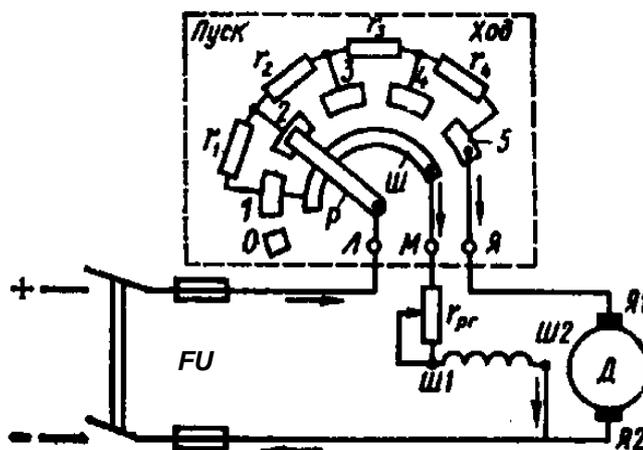
Обычно в двигателях постоянного тока падение напряжения $I_{ном}\Sigma R_a$ во внутреннем сопротивлении цепи якоря составляет 5...10% от $U_{ном}$, поэтому при прямом пуске ток якоря $I_n = U_{ном}/\Sigma R_a$, что создает опасность поломки вала машины и вызывает сильное искрение под щетками. Поэтому прямой пуск применяют в основном для двигателей малой мощности (до нескольких сотен ватт), в которых сопротивление ΣR_a относительно велико, и лишь в отдельных случаях для двигателей с последовательным возбуждением мощностью в несколько киловатт. При прямом пуске таких двигателей $I_n = (4...6)I_{ном}$.

2. Реостатный пуск.

Этот способ получил наибольшее применение рисунок 2.7.

Рисунок 2.7 – Схема включения пускового реостата

В начальный момент пуска при $n = 0$ ток $I_n = U/(\Sigma R_a + R_n)$. Максимальное



сопротивление пускового реостата R_n подбирается так, чтобы для машин большой и средней мощности ток якоря при пуске $I_n = (1,4...1,8)I_{ном}$, а для машин малой мощности $I_n = (2,0...2,5)I_{ном}$.

Рассмотрим процесс реостатного пуска на примере двигателя с параллельным возбуждением В начальный период пуск осуществляется по реостатной характеристике 6 рисунок 2.8, а, соответствующей максимальному значению сопротивления R_n пускового реостата; при этом двигатель развивает максимальный пусковой момент M_{nmax} . Регулировочный реостат $R_{p,2}$ в этом случае выводится так, чтобы ток возбуждения I_e и поток Φ были максимальными. По мере разгона момент двигателя уменьшается, так как с увеличением частоты вращения возрастает ЭДС E и уменьшается ток якоря $I_a = (U-E)/(\Sigma R_a + R_n)$. При достижении некоторого значения M_{nmin} часть сопротивления пускового реостата выводится, вследствие чего момент снова возрастает до M_{nmax} . При этом двигатель переходит на работу по реостатной характеристике 5 и разгоняется до значения M_{nmin} .

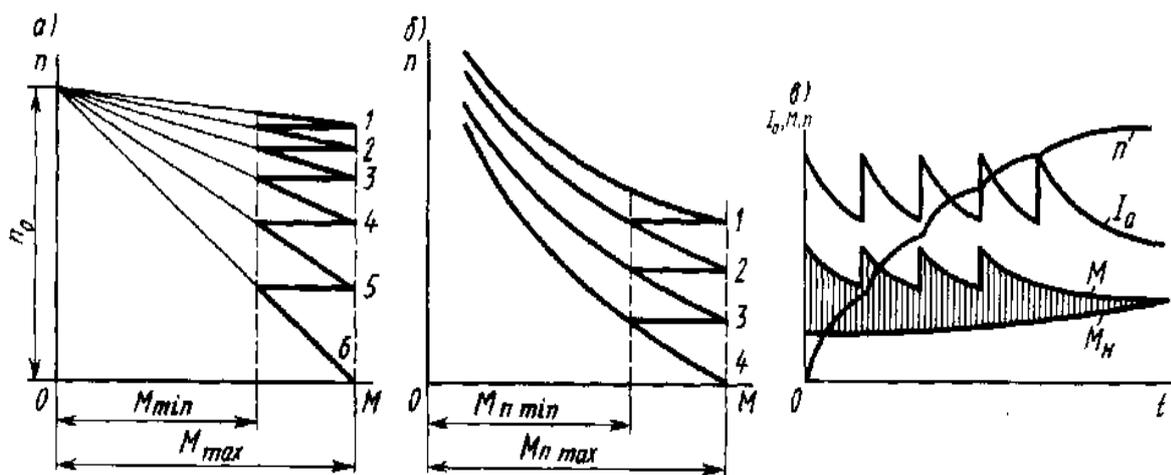


Рисунок 2.8 – Графики изменения частоты вращения, момента и тока якоря при реостатном пуске двигателя с параллельным и последовательным возбуждением

Таким образом, уменьшая постепенно сопротивление пускового реостата, осуществляют разгон двигателя по отдельным отрезкам реостатных характеристик 6, 5, 4, 3 и 2 (жирные линии на рис.2.8, а) до выхода на естественную характеристику 1. Средний вращающий момент при пуске $M_{ср} = 0,5 (M_{nmax} + M_{nmin}) = const$, вследствие чего двигатель разгоняется с некоторым постоянным ускорением. Таким же способом пускают в ход двигатель с последовательным возбуждением (рис.2.8, б). Количество ступеней пускового реостата зависит от жесткости естественной характеристики и требований, предъявляемых к плавности пуска (допустимой разности $(M_{nmax} - M_{nmin})$). Пусковые реостаты рассчитывают на кратковременную работу под током. При выводе отдельных ступеней пускового реостата токе якоря I_a достигает некоторого максимального зна-

чения рисунок 2.8, а, затем уменьшается до минимального значения. В соответствии с изменением тока якоря изменяется и электромагнитный момент M . Заштрихованная на рисунок 2.8, в, область соответствует значениям динамического момента $M_{дин} = M - M_n$, обеспечивающего разгон двигателя до установившейся частоты вращения.

3. *Пуск путем плавного изменения питающего напряжения.* При реостатном пуске возникают довольно значительные потери энергии в пусковом реостате. Это недостаток устраняется, если пуск двигателя осуществляется при пониженном напряжении, подаваемом на его обмотку. Для этого необходимо иметь отдельный источник постоянного тока с регулируемым напряжением (генератор или управляемый выпрямитель).

2.5. Регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Частота вращения двигателя постоянного тока определяется по следующему выражению:

$$n = [U - I_a(\Sigma R_a + R_{доб})]/(c_e \Phi) \quad (2.1)$$

Следовательно, ее можно регулировать тремя способами:

- включением добавочного реостата $R_{доб}$ в цепь обмотки якоря;
- изменением магнитного потока Φ .
- изменением питающего напряжения U ;

Способы регулирования частоты вращения двигателей оцениваются следующими показателями:

- плавностью регулирования;
- диапазоном регулирования, определяемым отношением наибольшей частоты вращения к наименьшей;
- экономичностью регулирования, определяемой стоимостью регулирующей аппаратуры и потерями электроэнергии в ней.

1. *Введение дополнительного сопротивления в цепь якоря.*

Дополнительное сопротивление $R_{дон}$ включают в цепь якоря аналогично пусковому реостату рисунок 2.7. Однако в отличие от последнего оно должно быть рассчитано на продолжительное протекание тока.

При включении сопротивления $R_{дон}$ в цепь якоря выражение частоты (2.1) принимает вид:

$$n = [U - I_a(\Sigma R_a + R_{доб})]/(c_e \Phi) = n_0 - \Delta n \quad (2.2)$$

где $n_0 = U/(c_e \Phi)$ - частота вращения в режиме холостого хода;

Δn - изменение частоты вращения, вызванное падением напряжения в цепи якоря. С увеличением $R_{\text{дон}}$ возрастает Δn , что ведет к уменьшению частоты вращения. Зависимость $n = f(R_{\text{дон}})$ иллюстрируется также и механическими характеристиками двигателя параллельного возбуждения рисунок 2.9, а: с повышением $R_{\text{дон}}$ увеличивается наклон механических характеристик, а частота вращения при заданной нагрузке на валу ($M=M_{\text{ном}}$) уменьшается. Этот способ обеспечивает плавное регулирование частоты вращения в широком диапазоне (только в сторону уменьшения частоты от номинальной), однако он неэкономичен из-за значительных потерь электроэнергии в регулировочном реостате, которые интенсивно растут с увеличением мощности двигателя.

2. *Изменение основного магнитного потока.* Этот способ регулирования в двигателе параллельного возбуждения реализуется посредством реостата r_{pr} в цепи обмотки возбуждения рисунок 2.7. Так, при уменьшении сопротивления реостата возрастает магнитный поток обмотки возбуждения, что сопровождается понижением частоты вращения. При увеличении сопротивления реостата частота вращения растет. Зависимость частоты вращения от тока возбуждения выражается регулировочной характеристикой двигателя $n = f(I_e)$ при $I = const$ и $U = const$.

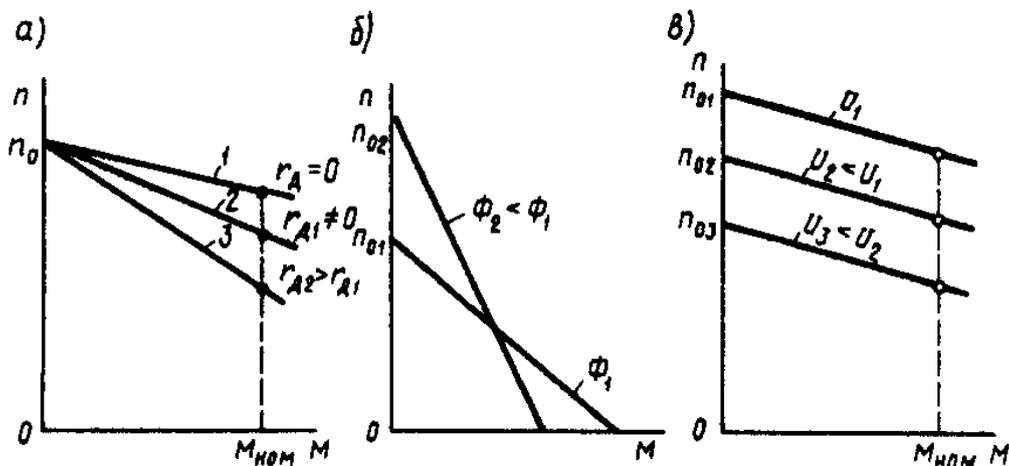


Рисунок 2.8 – Механические характеристики двигателя параллельного возбуждения:

- а - при введении в цепь якоря добавочного сопротивления;
- б - при изменении основного магнитного потока;
- в - при изменении напряжения в цепи якоря.

При небольшом нагрузочном моменте на валу двигателя максимальная частота вращения n_{max} во много раз превосходит номинальную частоту вращения двигателя $n_{\text{ном}}$ и является недопустимой по условиям механической прочности двигателя, т. е. может привести к его "разносу". Учитывая это, при выборе реостата r_{pr} необходимо следить за тем, чтобы при полностью введенном его

сопротивлении частота вращения двигателя не превысила допустимого значения.

Рассмотренный способ регулирования частоты вращения прост и экономичен, так как в двигателях параллельного возбуждения ток $I_g = (0,01 \dots 0,07)I_a$, а поэтому потери в регулировочном реостате невелики.

Однако диапазон регулирования обычно составляет $n_{max}/n_{min} = 2 \dots 5$. Объясняется это тем, что нижний предел частоты вращения обусловлен насыщением машины, ограничивающим значение магнитного потока Φ , а верхний предел частоты - опасностью "разноса" двигателя и усилением влияния реакции якоря, искажающее действие которого при ослаблении основного магнитного потока Φ усиливается и ведет к искрению на коллекторе или же к появлению кругового огня.

3. Изменение напряжения в цепи якоря.

Регулирование частоты вращения двигателя изменением питающего напряжения применяется лишь при $I_g = \text{const}$, то есть при отдельном питании цепей обмотки якоря и обмотки возбуждения при независимом возбуждении. Частота вращения в режиме холостого хода n_0 пропорциональна напряжению, а Δn от напряжения не зависит, поэтому механические характеристики двигателя при изменении напряжения не меняют угла наклона к оси абсцисс, а смещаются по высоте, оставаясь параллельными друг другу рисунок 2.9, в. Для осуществления этого способа регулирования необходимо цепь якоря двигателя подключить к источнику питания с регулируемым напряжением. Для управления двигателями малой и средней мощности в качестве такого источника можно применить регулируемый выпрямитель, в котором напряжение постоянного тока меняется регулировочным автотрансформатором (АТ), включенным на входе выпрямителя рисунок 2.10, а.

Для управления двигателями большой мощности целесообразно применять генератор постоянного тока независимого возбуждения; привод осуществляется посредством приводного двигателя (ПД), в качестве которого обычно используют трехфазный двигатель переменного тока. Для питания постоянным током цепей возбуждения генератора G и двигателя D используется возбудитель B - генератор постоянного тока, напряжение на выходе которого поддерживается неизменным. Описанная схема управления двигателем постоянного тока рисунок 2.10, б известна под названием системы "генератор-двигатель" (G - D).

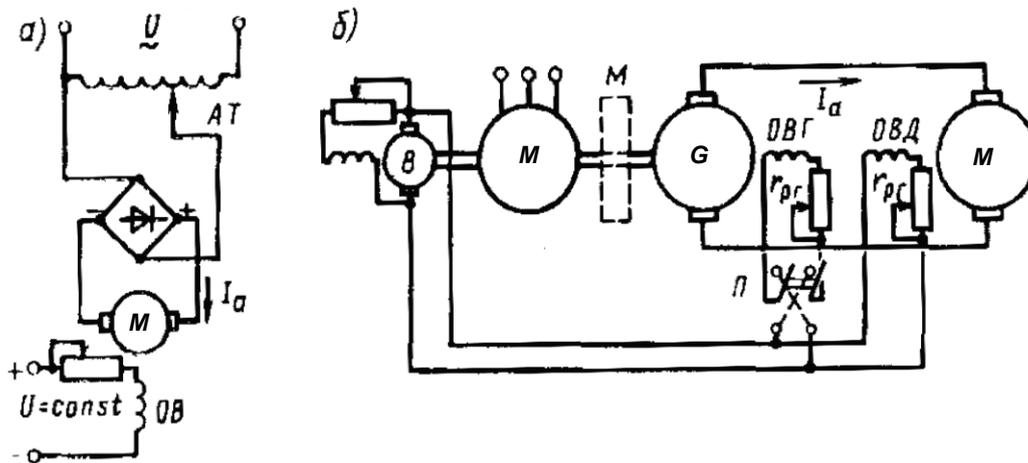


Рисунок 2.10 – Схемы включения двигателей постоянного тока при регулировании частоты вращения изменением напряжения в цепи якоря

Изменение напряжения в цепи якоря позволяет регулировать частоту вращения двигателя вниз от номинальной, так как напряжение свыше номинального недопустимо. При необходимости регулировать частоту вращения вверх от номинальной можно воспользоваться изменением тока возбуждения двигателя.

Изменение направления вращения (реверс) двигателя, работающего по системе Г - Д, осуществляется изменением направления тока в цепи возбуждения генератора Г переключателем Я, то есть переменной полярности напряжения на его зажимах. Если двигатель постоянного тока работает в условиях резко переменной нагрузки, то для сглаживания колебаний мощности, потребляемой ПД из трехфазной сети, на вал ПД помещают маховик М, который запасает энергию в период уменьшения нагрузки на двигатель Д и отдает ее в период интенсивной нагрузки двигателя.

Регулирование частоты вращения изменением напряжения в цепи якоря обеспечивает плавное экономичное регулирование в широком диапазоне $n_{max}/n_{min} > 25$. Наибольшая частота вращения здесь ограничивается условиями коммутации, а наименьшая - условиями охлаждения двигателя.

Еще одним достоинством рассматриваемого способа регулирования является то, что он допускает без реостатный пуск двигателя при пониженном напряжении.

Раздел 3. АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

3.1. Технический паспорт и типы электродвигателей

Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором (рис. 3.1) характеризуется номинальными данными, которые указываются на заводском щитке и в каталоге электродвигателей.

Номинальные данные асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором - это номинальная мощность на валу электродвигателя (P_n , кВт), номинальная частота вращения его вала при номинальной нагрузке (n_n , об/мин), номинальное напряжение (U_n , В), номинальная сила тока (I_n , А), род тока (\sim), частота питающей сети (f_n , Гц), коэффициент мощности при номинальной нагрузке ($\cos \varphi_n$), номинальный коэффициент полезного действия (η_n), класс нагревостойкости изоляции (А, Е, В, F, H, С), режим работы (S1, S2, S3 и т.д.).

Пусковые свойства асинхронного электродвигателя характеризуются кратностью пускового тока ($i = I_{\text{пуск}} / I_n$) и кратностью пускового момента ($\mu_n = M_{\text{пуск}} / M_n$), а перегрузочная способность двигателя – кратностью максимального момента ($\mu_k = M_{\text{макс}} / M_n$), которые указываются в каталоге электродвигателей.



Рисунок 3.1 – Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором

Обозначение электродвигателей

Наиболее распространённой электрической машиной, применяемой для привода сельскохозяйственных машин и механизмов, является трёхфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Это обусловлено сравнительно небольшой его стоимостью, простотой конструкции и высокой надёжностью в эксплуатации.

Асинхронные электродвигатели в целях упорядочения их шкал мощностей, скоростей и т. д., а также унификации применения выпускаются сериями, как в основном исполнении, так и в различных модификациях, с учётом областей применения, климатических условий, степени защищённости и т. д.

В настоящее время перед потребителем часто встает вопрос - как расшифровать маркировку электродвигателя. Во времена СССР такой вопрос практически не стоял из-за того, что маркировка электродвигателей не различалась в зависимости от завода-производителя и регламентировалась нормативными документами.

Основные типы двигателей назывались А, А2, АО2, 4А, 4АМ. Отличались по маркировке электродвигатели производимые в странах СЭВ, например, в Болгарии вместо маркировки 4АМ использовалась "МО" и вместо 4АМН - "М".

Сейчас многие заводы-изготовители используют свою маркировку. Приведем основные типы обозначений марок общепромышленных низковольтных асинхронных электродвигателей разных производителей.

Маркировка состоит из нескольких основных частей:

1. Марка.

2. Признак модификации.

3. Высота оси вращения.

4. Установочный размер по длине станины.

5. Длина сердечника.

6. Число полюсов.

7. Признак по назначению (конструктивная модификация).

8. Климатическое исполнение.

9. Категория размещения.

А И Р С 1 1 2 М А 8 Б У 3
1 2 3 4 5 6 7 8 9

1. Марка электродвигателя (электродвигатели всех марок одинаковы по присоединительным размерам и в большинстве случаев, при прочих равных условиях, взаимозаменяемы:

- с 1949 г. - **А** (IP23), **АО** (IP44)

- с 1961 г. - **A2** (IP23), **AO2** (IP44)
 - с 1975-1980 - **4A** (IP44), **4AH** (IP23), **4AM** (IP44), **4AMH** (IP23)
 - с 1985-1995 - **AIP** (IP44, IP54), **5AH** (IP23), **5AMH** (IP23)
- в настоящее время: AIP, A, 5A, 5AM, 5AMX, АД, АДМ, AIPM, (AO3, AO4 выпускаются ЗАО "БЭМЗ"):

"**AIP**" производят (по высоте оси вращения):

- ОАО "ELDIN" - 160
- ОАО "ВЭМЗ" - 180
- ОАО "Могилевский завод "Электродвигатель" - с 56 по 180
- ОАО "Полесьеэлектромаш" - с 71 по 112
- ЗАО "Мосэлектромаш" - с 56 по 71
- ОАО "Укрэлектромаш" - с 63 по 100
- ОАО "Электромотор" - 71, 80

"**A**" - ОАО "ELDIN" - с 71 по 132 и с 180 по 355.

"**5A**" - ОАО "ВЭМЗ" - 80 (снят с производства), 200, 225

"**5AM**" - ОАО "ВЭМЗ" - 250, 280, 315

"**5AMX**" - ОАО "ВЭМЗ" - со 132 по 180

"**АД**" - ОАО "Сибэлектромотор" - с 71 по 90 и с 132 по 225 (не производятся)

"**AIPM**" - ОАО "Сибэлектромотор" - 112 (не производятся)

"**AIPM**" - ОАО "Электромотор" - 63, 100

"**АДМ**" - ОАО "Уралэлектро" - с 56 по 132

"**AO3**", "**AO4**" - ЗАО "БЭМЗ"

2. Признак модификации (может применяться одновременно несколько обозначений в одной марке, ниже приведен не полный перечень).

- С - с повышенным скольжением
- E, 3E, EY - однофазный двигатель
- В - вставляемый
- П - пристраиваемый
- М - модернизированный
- Х - с алюминиевой станиной
- К - с фазным ротором
- Р - с повышенным пусковым моментом
- Ф - с принудительным охлаждением

3. Высота оси вращения.

В соответствии с ГОСТ 13267-73, ряд высот оси вращения - 50, 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315, 355 [2].

4. Установочный размер по длине станины.

По возрастанию: S, M, L. (от английских слов: Short, Medium, Long)

Также возможно отсутствие обозначения при единственном установочном размере по длине станины в одной высоте оси вращения.

5. Длина сердечника при одном и том же установочном размере.

По возрастанию: A, B, C.

6. Число полюсов (или частота вращения).

2, 4, 6, 8, 10, 12 или в случае многоскоростных электродвигателях: 2/4, 8/6/4, и т.д.

7. Признак по назначению (может применяться одновременно несколько обозначений в одной марке).

- Б - со встроенной температурной защитой
- Б1 - с датчиком температуры подшипника
- Б2 - с датчиком и антиконденсатным подогревателем
- Е - со встроенным тормозом
- Е2 - с тормозом с ручным растормаживающим устройством
- Ж, Ж1, Ж2 - со специальным выходным концом вала
- РЗ - для мотор-редукторов
- Ш - для промышленных швейных машин
- П - повышенной точности по установочным размерам
- Ф - хладономаслостойкое обозначение
- А - для атомных электростанций
- Х2 - химостойкие
- Л - для лифтов
- С - для станков-качалок
- СШ - для сушильных шкафов
- Н - малошумные
- К - по нормам CENELEK
- и т.д.

8. Климатическое исполнение.

У, УХЛ, ХЛ, Т, ... - по ГОСТ 15150-69 [3].

9. Категория размещения.

1, 2, 3, 4, ... - по ГОСТ 15150-69 [3].

Для того чтобы выбрать электродвигатель недостаточно указать правильную маркировку.

Необходимо указывать:

- IM - монтажное исполнение
- напряжение питания (220/380, 380, 380/660)
- IP - степень защиты (23, 44, 54, 55)

Технический паспорт асинхронного двигателя

В сельскохозяйственных электроприводах наибольшее распространение получили асинхронные электродвигатели серии АИР с короткозамкнутым ротором (около 90%). Заводы-изготовители выпускают АД с заводским щитком, на котором указаны основные паспортные технические данные:

АИР132М4СУ1 № 6120429
3 ~50 Hz 11 кВт Cos φ 0,85
1450 об/мин Δ/У 220/380
38,4/22,2 к.п.д. 88,5%
83,5 кг IP44 S1 кл.изол. В

АИР132М4СУ1 – тип электродвигателя;

№ 6120429 - заводской номер;

3 ~50 Hz – число фаз, род тока, частота тока питающей сети, Гц;

11 кВт – номинальная мощность электродвигателя, кВт;

Cos φ 0,85 – номинальный коэффициент мощности АД, о.е.;

1450 об/мин - частота вращения ротора АД при номинальной нагрузке;

Δ/У 220/380 - схемы подключения обмоток АД: Δ - «треугольник» У - «звезда» и номинальные напряжения соответствующие этим схемам, В;

38,4/22,2 А – номинальные токи статора на Δ и У, А;

к.п.д. 88,5% - номинальный коэффициент полезного действия АД, %;

83,5 кг – масса АД, кг;

IP44 – исполнение АД по степени защиты;

S1 – режим работы АД;

кл. изол. В – класс нагревостойкости изоляции.

Номинальный режим АД соответствует условиям работы и данным, указанным в его паспорте. При этом режиме АД в отношении нагрева, коэффициента полезного действия, коэффициента мощности, коммутации, электриче-

ской прочности и другим показателям должен удовлетворять установленным требованиям.

Номинальной мощностью (P_n) АД называется мощность, развиваемая на валу двигателя при номинальном режиме; эта мощность выражается в кВт и указывается в паспорте.

Номинальной частотой вращения (n_n), **номинальным напряжением** (U_n), **номинальным током** (I_n), **номинальным коэффициентом полезного действия** (η_n) и **номинальным коэффициентом мощности** ($\cos\varphi_n$) называются частота, напряжение, ток, к.п.д. и коэффициент мощности указанные в паспорте АД, при условии, что остальные величины, характеризующие режим работы, имеют также номинальное значение.

Правильное обозначение модификаций и исполнений серии важно для автоматической системы управления производством (АСУП), а также для создания системы ведения чертёжного хозяйства как части общей системы автоматизированного проектирования (САПР).

Серия АИ содержит большое количество модификаций и исполнений. Для обозначения серии АИ принята структура, в которой три вида обозначения: *базовое, основное, полное*.

Базовое обозначение - это сочетание символов, определяющих серию АД, мощность, частоту вращения (обозначение серии, вариант увязки мощности к установочным размерам, высота оси вращения, установочный размер по длине станины и длина магнитопровода статора, число полюсов).

Например: АИР100М4 (серия АИ, увязка по варианту Р, высота оси вращения 100, длина корпуса по установочным размерам М, число полюсов 4).

Основное обозначение - это сочетание базового исполнения АД с видом защиты и охлаждения, с электрической и конструктивной модификацией, со специализированным исполнением и исполнением по условиям окружающей среды

Например: АИРБС100М4НПТ2 (АИР100М4 - базовое обозначение, Б - закрытое исполнение с естественным охлаждением без обдува, С - с повышенным скольжением, Н - малошумные, П - с повышенной точностью установочных размеров, Т - для тропического климата, 2 - категория размещения).

Полное обозначение - сочетание основного обозначения с дополнительными электрическими и конструктивными характеристиками.

Например: АИРБС 100М4НПТТ2 220/380В, 60 IM2181, КЗ-11-3, F 100, (АИРБС100М4НПТ2 - основное обозначение, 220 / 380В - напряжение, 60 - частота сети, IM 2181 - исполнение по способу монтажа и по концу вала, КЗ-11-3

- исполнение выводного устройства и количество штуцеров, F100 - исполнение фланцевого щита).

Классификация исполнений электрических машин по способу монтажа дана в Публикации МЭК34-7 и в СТ СЭВ 246-76. Согласно этим документам конструктивное исполнение электрической машины обозначается символом IM и четырьмя цифрами.

Условное обозначение конструктивного исполнения расшифровывается так:

IM	X	XX	X
1	2	3	4

1 - буквенная часть обозначения;

2 - первая цифра определяет группу конструктивных исполнений. Серия АД Интерэлектро производится по трём группам исполнений (1 - на лапах, с подшипниковыми щитами; 2 - на лапах, с подшипниковыми щитами и с фланцем на подшипниковом щите или щитах; 3 - без лап, с подшипниковыми щитами и с фланцем на одном подшипниковом щите);

3 - вторая и третья цифры обозначают способ монтажа. Вторая цифра для группы IM1 - 0. Третья указывает на расположение вала двигателя в пространстве при монтаже. Для группы IM1 - третья цифра обозначает: 0 - вал горизонтальный, машина лапами вниз; 1 - вал вертикальный, конец вала вниз; 3 - вал вертикальный, конец вала вверх; 5 - вал горизонтальный, конец вала влево, машина крепится лапами на вертикальной плоскости; 6 - вал горизонтальный, конец вала направо, машина крепится на вертикальной плоскости; 7 - вал горизонтальный, машина крепится на горизонтальной плоскости лапами вверх; 8 - машина может работать при любом направлении конца вала;

4 - исполнение выступающего конца вала: 0 - без конца вала; 1 - с одним цилиндрическим концом вала; 2 - с двумя цилиндрическими; 3 - с одним коническим; 4 - с двумя коническими; 6, 7 и 9 - в асинхронных двигателях общего назначения не применяются.

Обозначение вводных устройств расшифровывается так: К-3-I - с панелью выводов и одним штуцером; К-3-II - с панелью выводов и двумя штуцерами; К-3-M - с панелью выводов и удлинителем под сухую разделку кабеля или под эпоксидную заделку; К-2-I - без панели выводов с одним штуцером; К-2-II - без панели выводов с двумя штуцерами.

Основным исполнением вводных устройств является устройство с панелью выводов и одним штуцером (К-3-I). По заказу потребителя заводы-изготовители двигателей устанавливают вводное устройство с двумя штуцерами.

ми. Два штуцера необходимо для ввода дополнительных проводов в двигатели с температурной защитой и др.

3.2. Расчет основных электромеханических параметров по паспортным данным

Для выбора аппаратуры управления и защиты, электроизмерительных приборов необходимо определить по паспортным данным основные электромеханические параметры: номинальную мощность, активную мощность, полную мощность, реактивную мощность, номинальный ток при работе электродвигателя по схеме "Δ" и "Y", пусковой ток, число пар полюсов на фазу, обороты магнитного поля статора (синхронную скорость), номинальные обороты ротора (асинхронную скорость), номинальное скольжение.

Расчет мощностей представлен структурно-энергетической схемой (рис.3.2).

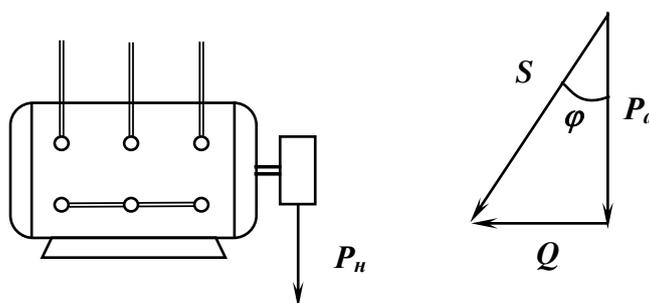


Рисунок 3.2 – Структурно-энергетическая схема

1. В техническом паспорте приводится номинальная мощность P_n , развиваемая электродвигателем на валу. Если этот параметр по некоторым причинам отсутствует, то его можно определить по следующей формуле:

$$P_n = \frac{\sqrt{3}U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n}{1000} \text{ кВт},$$

где U - номинальное напряжение, В; I - номинальный ток, А; $\cos \varphi$ - номинальный коэффициент мощности, отн. ед.; η - номинальный КПД.

2. *Активная мощность* - расходуется на преобразование электрической энергии в механическую работу и на покрытие электрических и механических потерь.

$$P_a = \frac{P_n}{\eta} = \frac{\sqrt{3}U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n}{1000} \text{ кВт},$$

3. *Полная (кажущая)* - расходуется на преобразование электрической

энергии в механическую работу, на покрытие электрических и механических потерь и на создание магнитного поля.

$$S = \frac{P_a}{\cos \varphi} = \frac{\sqrt{3}U_n \cdot I_n}{1000} \text{ кВа},$$

4. Реактивная мощность кВА (киловольтамперы реактивные) - расходуется на создание магнитного поля. Пользуясь треугольником мощностей рисунок 3.2, реактивную мощность можно рассчитать по формулам:

$$Q = \sqrt{S^2 - P_a^2} = S \cdot \sin \varphi = P_a \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

5. В буквенно-цифровом обозначении типов электродвигателей указывается число полюсов, приходящихся на одну фазу обмотки статора: $2p = 2, 4, 6, 8, 10, 12...$ По этому параметру можно рассчитать обороты магнитного поля статора (синхронную скорость):

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ об/мин.},$$

где f - частота тока, Гц; p - число пар полюсов на фазу.

В техническом паспорте приводятся номинальные обороты ротора n_n , (асинхронная скорость). Зная асинхронную и синхронную скорости, можно рассчитать величину номинального скольжения для данного электродвигателя.

3.3. Маркировка выводов. Схемы включение

Асинхронный двигатель состоит из двух основных частей, разделенных воздушным зазором: неподвижного статора и вращающего 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. Двигатели с короткозамкнутым ротором имеют наиболее широкое применение. Концы обмоток фаз выводят на зажимы коробки выводов. На рис.3.3. показана маркировка и расположение выводов обмотки статора.

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 220/380 В. Если в сети линейное напряжение 380 В, то обмотку статора следует соединить звездой (рис.3.4, а), а если 220 В, то треугольником (рис.3.4, б).

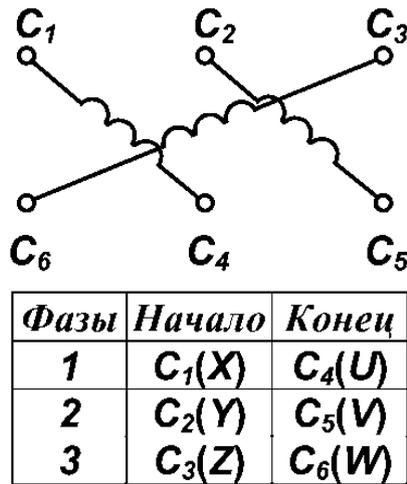


Рисунок 3.3 – Маркировка и расположение выводов обмотки статора

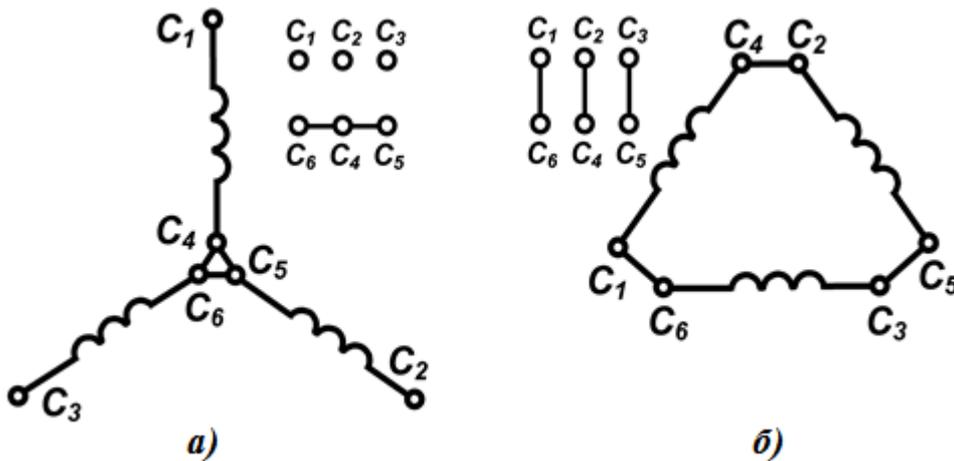


Рисунок 3.4 – Положение перемычек и схема соединений обмотки статора звездой (а) и треугольником (б)

Выводы обмоток фаз располагают на панели таким образом, чтобы соединения обмоток фаз было удобно выполнять посредством перемычек, без перекрещивания последних. 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).

3.4. Пуск двигателей с короткозамкнутым ротором

Пуск непосредственным включением в сеть. Этот способ пуска, отличаясь 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 и дополнительного 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 до 38 кВт.

Пуск при пониженном напряжении. 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* рисунок 3.5, 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. 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. 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* рисунок 3.5, б (реактивных катушек - дросселей). Ток при этом поступает в обмотку статора через реакторы.

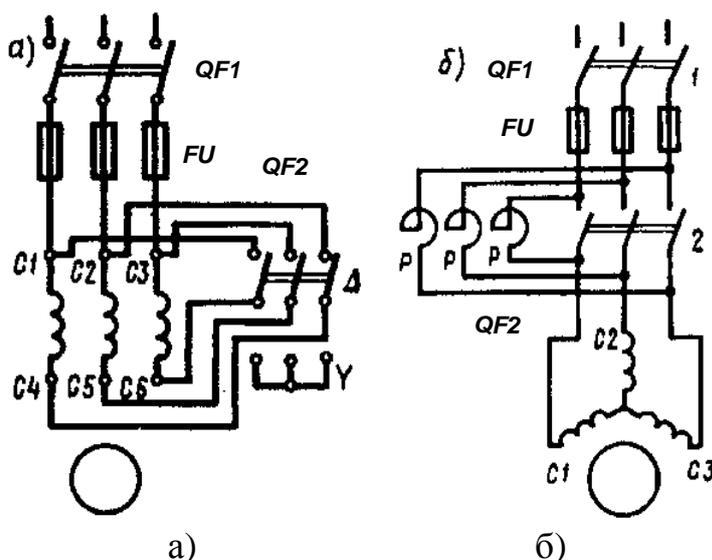


Рисунок 3.5 – Схемы включения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором переключением обмотки статора со звезды на треугольник (а) и реакторного (б)

3.5. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей

Современный электропривод рабочих машин сельскохозяйственного производства выполняется в основном на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором. С развитием и совершенствованием сельскохозяйственного производства возникает необходимость в регулировании или стабилизации скорости рабочих машин: при раздаче кормов, в установках микроклимата животноводческих помещений, птичников и складов хранения сельскохозяйственной продукции, водоснабжения, стационарного или мобильного обмолота зерновых культур, дробления и размола зерна и т.д.

Технико-экономическое сопоставление различных вариантов регулирования скорости электрических приводов показало, что для требуемых исходных условий, предъявляемых технологией, наиболее полно отвечают асинхронные двигатели, имеющие меньшую массу и стоимость, обладающие повышенной надежностью и простотой по сравнению с двигателем постоянного тока.

Частота вращения ротора асинхронного двигателя

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

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 тремя способами: изменением подводимого к обмотке статора напряжения, нарушением симметрии этого напряжения; 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 различных значений U_1 рисунок 3.6. 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 превышением номинального значения напряжения.

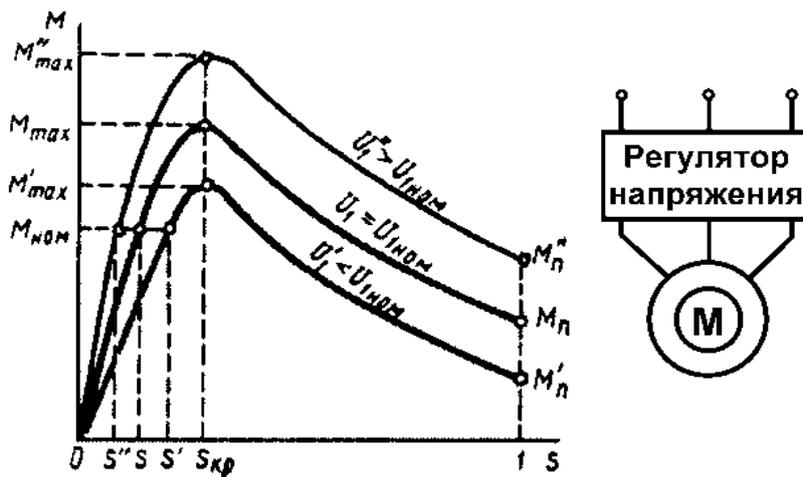


Рисунок 3.6 – Влияние напряжения на вид механической характеристики асинхронного двигателя

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, включаемые 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 подвод мой к двигателю трехфазной системы напряжения вращающее 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 рисунок 3.7, а, (кривая 1) и характеристикой при однофазном питании двигателя (кривая 2) - пределом несимметрии трехфазного напряжения.

Для регулировки несимметрии подводимого напряжения можно в цепь одной из фаз включить однофазный регулировочный автотрансформатор (АТ) рисунок 3.7, б.

При уменьшении напряжения на выходе АТ несимметрии увеличивается и частота вращения ротора уменьшается. Недостаток этого способа регулирования являются узкая зона регулирования уменьшение КПД двигателя по мере увеличения несимметрии напряжения. Обычно этот способ регулирования частоты вращения меняют лишь в двигателях малой мощности.

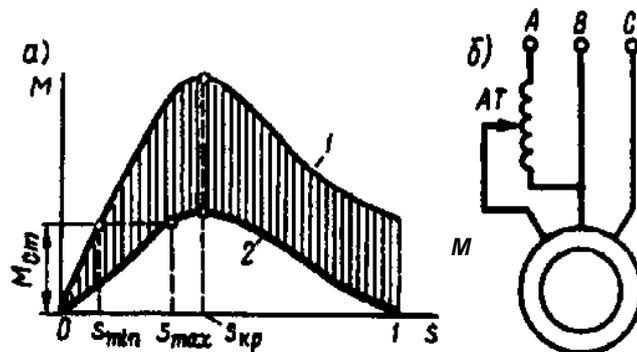


Рисунок 3.7 – Механические характеристики (а) и схема включения (б) асинхронного двигателя при регулировании частоты вращения изменением симметрии трехфазной системы

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 различных значений активного сопротивления цепи ротора рисунок 3.8, показывают, что с увеличением активного сопротивления ротора возрастает скольжение, соответствующее заданному нагрузочному моменту.

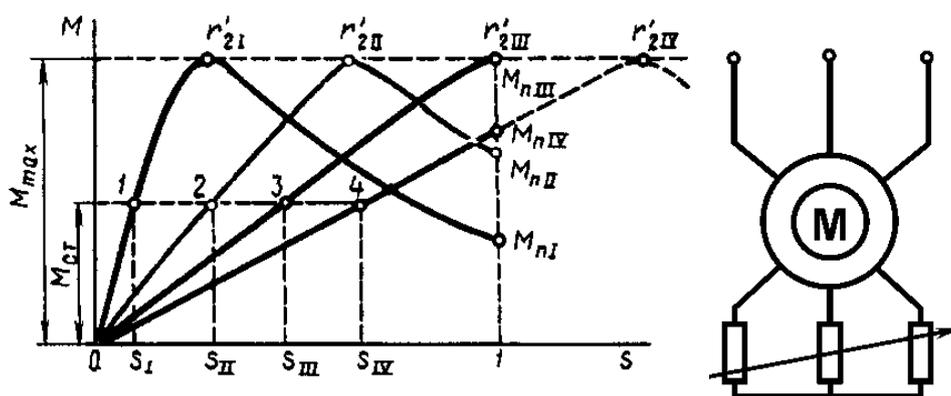


Рисунок 3.8 – Влияние сопротивления цепи ротора на колебания частоты вращения при изменении нагрузки

Практически изменение активного сопротивления цепи ротора достигается включением в цепь ротора регулировочного реостата рассчитанного на дли-

тельный режим работы. Электрические потери в роторе пропорциональны скольжению 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.

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 R_p) или ступенчатым (при ступенчатом изменении сопротивления R_p). Способ обеспечивает регулирование частоты вращения в широком диапазоне, но только вниз от синхронной частоты вращения.

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 необходимо, 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. Но с изменением частоты будет изменяться и максимальный момент. Поэтому 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. 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:

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

где: U_1 и M - напряжение и момент при частоте f_1 ; U'_1 и M' - напряжение и момент при частоте 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 изменять соответствии с законом

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

Частотное регулирование двигателей позволяет плавно изменять частоту вращения в широком диапазоне (до 12:1). Однако источники питания с регулируемой частотой тока удорожают установку. Но благодаря развитию силовой проводниковой техники в последние годы созданы устройства частотного регулирования, технико-экономические показатели которых оправдывают их индивидуальное применение для регулирования частоты вращения одиночных двигателей. 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: 3000, 1500, 1000, 750, 600 об/мин. Изменить число полюсов в обмотке статора рис. 3.13.

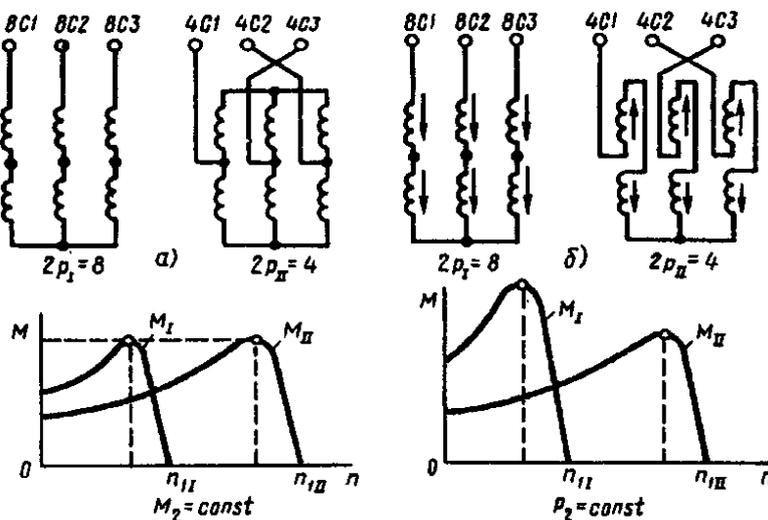


Рисунок 3.9 – Схемы переключения числа полюсов и механические характеристики в режимах постоянного момента (а) и постоянной скорости (б)

Это достигается 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 основан на том, что: при последовательном согласном соединении двух катушек возбуждаемое ими магнитное поле образует четыре полюса, а при последовательном встречном или параллельном соединении - 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.

Возможны два режима работы асинхронных двигателей с полюсно переключаемыми обмотками: *режим постоянного момента* рисунок 3.9, 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 рисунок 3.9, 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 :

$$M_2 = 9,55 P_2 / n_2.$$

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 сменить полюсно переключаемую обмотку, что привело бы к недопустимому усложнению двигателя.

3.6. Электропривод с однофазным двигателем

Электропривод с однофазным двигателем получил широкое применение в бытовой технике (стиральные машины, пылесосы, маломощные вентиляторы, соковыжималки, кофемолки и т.п.)

По своему устройству однофазный асинхронный двигатель аналогичен трехфазному и состоит из статора, в пазах которого уложена однофазная обмотка, и короткозамкнутого ротора. Однофазные двигатели имеют две обмотки статора: рабочую и пусковую. Выводы обмоток однофазного двигателя маркируют следующим образом: рабочая – С1 - С2, пусковая – П1-П2. В машинах малой мощности выводы обмоток однофазных двигателей маркируют цветными проводами: начало и конец рабочей обмотки соответственно красным и красным с черным; начало и конец пусковой обмотки – соответственно синим и синим с черным; общий вывод от рабочей и пусковой обмоток – черным. Пусковая обмотка используется во время пуска для создания в нем вращающегося магнитного поля.

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

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

Для этого в цепь пусковой обмотки включают фазосмещающий элемент (ФЭ), в качестве которого могут быть применены активное сопротивление, индуктивность или емкость. При этом следует помнить, что лишь только емкость C в качестве ФЭ обеспечивает получения фазового сдвига между токами в 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.

Пусковую обмотку включают вместе с рабочей во время пуска двигателя (до 3с). Для повышения пускового момента в цепь пусковой обмотки может быть включено активное, индуктивное или емкостное сопротивление (рис.3.10, а, б). Получили распространение однофазные двигатели с активным сопротивлением в качестве ФЭ. При этом повышенное активное сопротивление пусковой обмотки достигается тем, что она выполняется проводом уменьшенного се-

чения (по сравнению с проводом рабочей обмотки). Так как эта обмотка включена на непродолжительное время, то такая ее конструкция вполне допустима ($M_{пуск} = M_{ном}$).

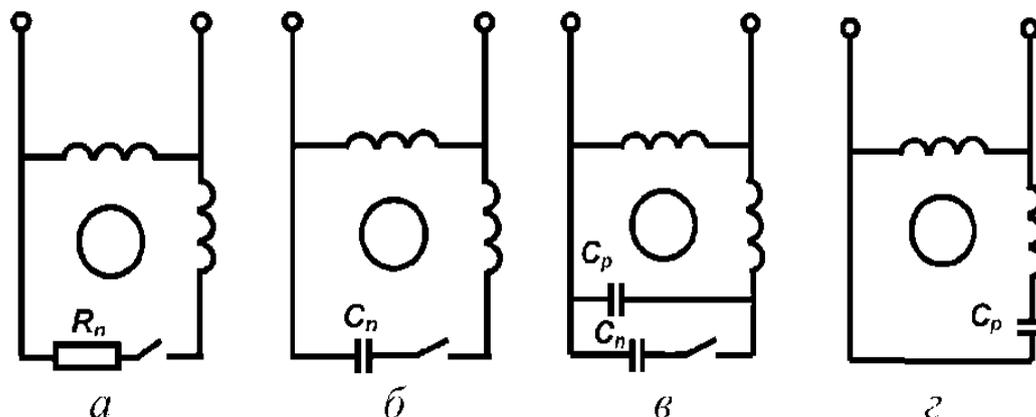


Рисунок 3.10 – Схемы включения однофазных электродвигателей: а – с пусковым сопротивлением; б – с пусковой емкостью; в – с пусковой и рабочей емкостями; г – с постоянно включенной емкостью.

Наиболее эффективно включение в цепь обмоток конденсаторов, что позволяет получить пусковой момент $M_{пуск} = (1,5 \div 2,0)M_{ном}$ (рис.3.10, в, г). Такие электродвигатели называются конденсаторными.

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.3.10, г). 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 в пусковой и рабочей обмотке.

Таким образом, если однофазный асинхронный двигатель по окончании процесса пуска работает с пульсирующей МДС статора, то конденсаторный двигатель – с вращающейся. Для повышения пускового момента параллельно емкости $C_{раб}$ включают емкость $C_{пуск}$, называемую пусковой (рис.3.10, в).

Раздел 4. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

4.1. Устройство, принцип действия

Синхронные машины - это бесколлекторные машины переменного тока. По своему устройству они отличаются от асинхронных машин лишь конструкцией ротора, который может быть явнополюсным или неявнополюсным. 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 составляют основу электротехнического оборудования электростанций, т. е. практически вся электроэнергия вырабатывается синхронными генераторами. Единичная мощность современных синхронных генераторов достигает миллиона киловатт и более. Синхронные двигатели применяются главным образом для привода устройств большой мощности, а также в том случае, когда необходимо обеспечить абсолютно жесткую механическую характеристику. 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.

4.1.1. Возбуждение синхронных машин

На роторе синхронного генератора расположен источник МДС (индуктор), создающий в генераторе магнитное поле. С помощью приводного двигателя (*ПД*) ротор генератора приводится во вращение с синхронной частотой n_1 . При этом магнитное поле ротора также вращается и, сцепляясь с обмоткой статора, наводит в ней ЭДС.

Синхронные двигатели конструктивно почти не отличаются от синхронных генераторов. Они также состоят из статора с обмоткой и ротора. Поэтому независимо от режима работы любая синхронная машина нуждается в процессе возбуждения - наведения в ней магнитного поля.

Основным способом возбуждения синхронных машин является *электромагнитное* возбуждение, сущность которого состоит в том, что на полюсах ротора располагают обмотку возбуждения. При прохождении по этой обмотке по-

стоянного тока возникает МДС возбуждения, которая наводит в магнитной системе машины магнитное поле.

До последнего времени для питания обмотки возбуждения применялись специальные генераторы постоянного тока независимого возбуждения (возбудители рисунок 4.1, а, обмотка возбуждения которого получала питание постоянного тока от другого генератора (параллельного возбуждения), называемого подвозбудителем (ПВ). Ротор синхронной машины и якоря возбудителя и подвозбудителя располагаются на общем валу и вращаются одновременно. При этом ток в обмотку возбуждения синхронной машины поступает через контактные кольца и щетки. Для регулирования тока возбуждения применяют регулировочные реостаты, включаемые в цепи возбуждения возбудителя и подвозбудителя.

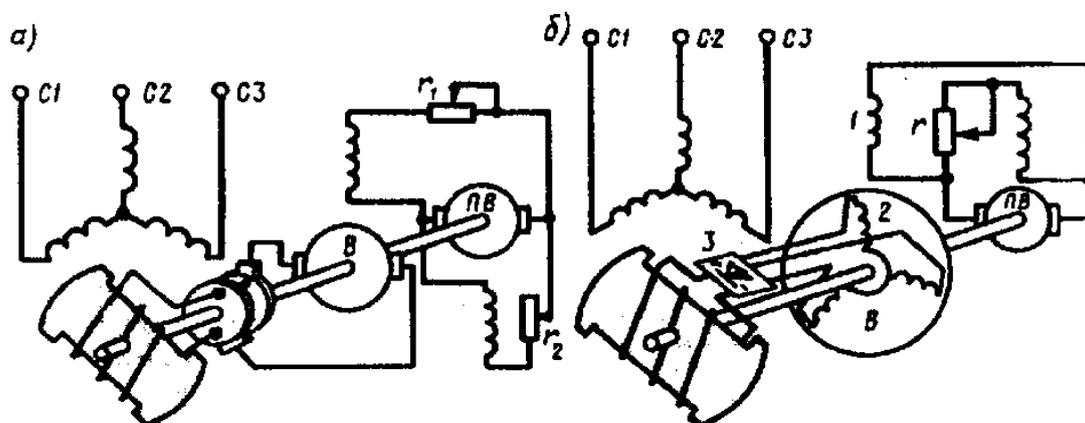


Рисунок 4.1 – Контактная (а) и бесконтактная (б) системы электромагнитного возбуждения синхронных генераторов

В синхронных генераторах средней и большой мощности процесс регулирования тока возбуждения автоматизируют.

В синхронных генераторах большой мощности - турбогенераторах - иногда в качестве возбудителя применяют генераторы переменного тока индукторного типа. На выходе такого генератора включают полупроводниковый выпрямитель. Регулировка тока возбуждения синхронного генератора и в этом случае осуществляется изменением возбуждения индукторного генератора.

Получила применение в синхронных генераторах бесконтактная система электромагнитного возбуждения при которой синхронный генератор не имеет контактных колец на роторе.

В качестве возбудителя и в этом случае применяют генератор переменного тока рисунок 4.1, б, у которого обмотка 2, в которой наводится ЭДС (обмотка якоря), расположена на роторе, а обмотка возбуждения 7 расположена на статоре. В результате обмотка якоря возбудителя и обмотка возбуждения син-

хронной машины оказываются вращающимися и их электрическое соединение осуществляется непосредственно, без контактных колец и щеток. Но так как возбудитель является генератором переменного тока, а обмотку возбуждения необходимо питать постоянным током, то на выходе обмотки якоря возбудителя включают полупроводниковый преобразователь 3, закрепленный на валу синхронной машины и вращающийся вместе с обмоткой возбуждения синхронной машины и обмоткой якоря возбудителя. Питание постоянным током обмотки возбуждения 1 возбудителя осуществляется от подвозбудителя (ПВ) - генератора постоянного тока.

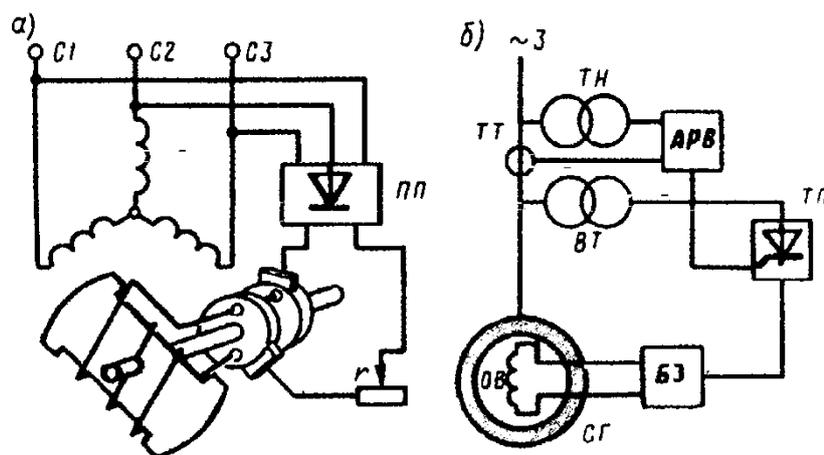


Рисунок 4.2 – Принцип самовозбуждения синхронных генераторов

Отсутствие скользящих контактов в цепи возбуждения синхронной машины позволяет повысить ее эксплуатационную надежность и увеличить КПД

В синхронных генераторах, в том числе гидрогенераторах, получил распространение принцип самовозбуждения рисунок 4.2, а, когда энергия переменного тока, необходимая для возбуждения, отбирается от обмотки статора синхронного генератора и через понижающий трансформатор и выпрямительный полупроводниковый преобразователь (ПП) преобразуется в энергию постоянного тока. Принцип самовозбуждения основан на том, что первоначальное возбуждение генератора происходит за счет остаточного магнетизма магнитопровода машины.

На рисунок 4.2, б представлена структурная схема автоматической системы самовозбуждения синхронного генератора (СГ) с выпрямительным трансформатором (ВТ) и тиристорным преобразователем (ТП), через которые электроэнергия переменного тока из цепи статора СГ после преобразования в постоянный ток подается в обмотку возбуждения. Управление тиристорным преобразователем осуществляется посредством автоматического регулятора возбуждения АРВ, на вход которого поступают сигналы напряжения на выходе СГ (через трансформатор напряжения ТН) и тока нагрузки СГ (от трансформатора

тока TT). Схема содержит блок защиты $BЗ$, обеспечивающий защиту обмотки возбуждения и тиристорного преобразователя $ТП$ от перенапряжений и токовой перегрузки.

В современных синхронных двигателях для возбуждения применяют *тиристорные возбуждательные устройства*, включаемые в сеть переменного тока и осуществляющие автоматическое управление током возбуждения во всевозможных режимах работы двигателя, в том числе и переходных. Такой способ возбуждения является наиболее надежным и экономичным, так как КПД тиристорных возбуждательных устройств выше, чем у генераторов постоянного тока. Промышленностью выпускаются тиристорные возбуждательные устройства на различные напряжения возбуждения с допустимым значением постоянного тока 320 А.

Наибольшее распространение в современных сериях синхронных двигателей получили возбуждательные тиристорные устройства типов ТЕ8-320/48 (напряжение возбуждения 48В) и ТЕ8-320/75 (напряжение возбуждения 75В).

Мощность, затрачиваемая на возбуждение, обычно составляет от 0,2 до 5% полезной мощности машины (меньшее значение относится к машинам большой мощности).

В синхронных машинах малой мощности находит применение принцип *возбуждения постоянными магнитами* когда на роторе машины располагаются постоянные магниты. Такой способ возбуждения дает возможность избавить машину от обмотки возбуждения. В результате конструкция машины упрощается, становится более экономичной и надежной. Однако из-за дефицитности материалов для изготовления постоянных магнитов с большим запасом магнитной энергии и сложности их обработки применение возбуждения постоянными магнитами ограничивается лишь машинами мощностью не более нескольких киловатт.

4.1.2. Типы синхронных машин и их устройство

Синхронная машина состоит из неподвижной части - статора - и вращающейся части - ротора. Статоры синхронных машин в принципе не отличаются от статоров асинхронных двигателей, т. е. состоят из корпуса, сердечника и обмотки.

Конструктивное исполнение статора синхронной машины может быть различным в зависимости от назначения и габарит машины. Так, в многополюсных машинах большой мощности при наружном диаметре сердечника статора более 900 мм пластин сердечника делают из отдельных сегментов, кото-

рые при сборке образуют цилиндр сердечника статора. Корпуса статоров крупногабаритных машин делают разъемными, что необходимо для удобства транспортировки и монтажа этих машин.

Роторы синхронных машин могут иметь две принципиально различающиеся конструкции: явнополюсную и неявнополюсную.

В энергетических установках по производству электроэнергии переменного тока в качестве первичных (приводных) двигателей синхронных генераторов применяют в основном три вида двигателей: паровые турбины, гидравлические турбины либо двигатели внутреннего сгорания (дизели). Применение любого из перечисленных двигателей принципиально влияет на конструкцию синхронного генератора.

Если приводным двигателем является *гидравлическая турбина*, то синхронный генератор называют гидрогенератор. Гидравлическая турбина обычно развивает небольшую частоту вращения (60-500 об/мин), поэтому для получения перемены тока промышленной частоты (50 Гц) в гидрогенераторе применяют ротор с большим числом полюсов. Роторы гидрогенераторов имеют *явнополюсную конструкцию* т. е. с явно выраженными полюсами, при которой каждый полюс выполняют в виде отдельного узла, состоящего из сердечника, полюсного наконечника и полюсной катушки. Все полюсы ротора закреплены на ободке являющемся также и ярмом магнитной системы машины, в котором замыкаются потоки полюсов. Гидрогенераторы обычно изготавливаются с вертикальным расположением вала.

Паровая турбина работает при большой частоте вращения, поэтому приводимый ею во вращение генератор, называемый турбогенератором, является быстроходной синхронной машиной. Роторы этих генераторов выполняют либо двухполюсными ($n_1 = 3000$ об/мин), либо четырехполюсными ($n_1 = 1500$ об/мин). Поэтому для снижения центробежных сил в турбогенераторах применяют неявнополюсный ротор.

Большую группу синхронных машин составляют синхронные двигатели, которые обычно изготавливаются мощностью до нескольких тысяч киловатт и предназначены для привода мощных вентиляторов, мельниц, насосов и других устройств, не требующих регулирования частоты вращения.

Ротор синхронного двигателя может вращаться только с синхронной частотой $n_1 = f_1 \cdot 60/p$. Чтобы убедиться в этом, достаточно предположить, что ротор двигателя начнет вращаться с частотой $n_2 < n_1$. В какой-то момент времени намагниченные полюсы ротора расположатся против одноименных полюсов вращающегося магнитного поля статора и тогда нарушится магнитная связь между намагниченными полюсами ротора и полюсами вращающегося поля

статора, так как их одноименные полюсы будут взаимно отталкиваться и ротор, перестав испытывать устойчивое действие вращающего электромагнитного момента, остановится.

Вращение ротора синхронных двигателей только с синхронной частотой составляет характерную особенность этих двигателей и часто определяет область их применения (например, для привода устройств, требующих стабильной частоты вращения).

По своей конструкции синхронные двигатели в принципе не отличаются от синхронных генераторов, но все же имеют некоторые особенности. Их изготавливают преимущественно явнополюсными с $2p = 6 \div 24$ полюсов; воздушный зазор делают меньшим, чем в генераторах такой же мощности, что способствует улучшению ряда параметров двигателя, в частности уменьшению пускового тока; демпферную (успокоительную) обмотку выполняют стержнями большего сечения, так как при пуске двигателя она является пусковой обмоткой; ширина полюсного наконечника достигает $0,9\tau$ вместо $0,7\tau$ в генераторах. Поэтому, несмотря на свойство обратимости, синхронные машины, выпускаемые промышленностью, имеют обычно целевое назначение либо это синхронные генераторы, либо синхронные двигатели.

4.2. 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). Схема включения двигателя при этом способе пуска приведена на рис. 4.3, а. Невозбужденный синхронный двигатель включают в сеть. Возникшее при этом вращающееся магнитное поле статора наводит в стержнях пусковой клетки ЭДС, которые создают токи. 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. 4.3, б). После разгона ротора до частоты

вращения, близкой к синхронной ($n_2 \approx 0,95n_1$), 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.

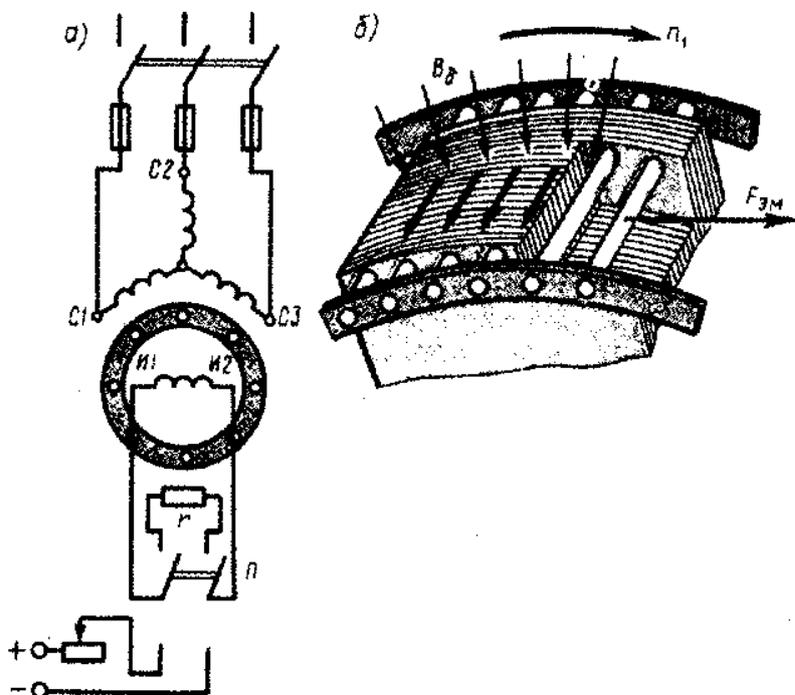


Рисунок 4.3 – Асинхронный пуск синхронного двигателя

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} .

При асинхронном пуске синхронного двигателя возникает значительный пусковой ток. Поэтому пуск синхронных двигателей посредством 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: трансформаторный или реакторный.

Раздел 5. ТРАНСФОРМАТОРЫ

5.1. Назначение трансформатора. Классификация трансформаторов

Трансформаторы широко применяются в системах передачи и распределения электроэнергии. Например, при передаче электроэнергии мощностью 10^6 кВт на расстояние 1000 км необходимо напряжение 500 кВ. Получить такое высокое напряжение в генераторе невозможно, поэтому электроэнергия после генератора подается на повышающий трансформатор, в котором напряжение увеличивается до требуемого значения.

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.

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.

Наибольшее применение в электротехнических установках, а также в энергетических системах передачи и распределения энергии имеют *силовые трансформаторы*, посредством которых изменяют значения переменного напряжения и тока. При этом число фаз, форма кривой напряжения (тока) и частота остаются неизменными. Силовые трансформаторы общего назначения применяются в линиях передачи и распределения электроэнергии, а также в различных электроустройствах для получения требуемого напряжения.

Трансформаторы специального назначения характеризуются разнообразием рабочих свойств и конструктивного исполнения. К специальным трансформаторам относятся печные и сварочные трансформаторы, трансформаторы для устройств автоматики (импульсные, пик-трансформаторы, умножители частоты и т.д.), испытательные и измерительные трансформаторы и т.д.

5.2. 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 рисунок 5.1, а вертикальные стержни 1, на которых расположены обмотки 2, сверху и снизу замкнуты ярами 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 .

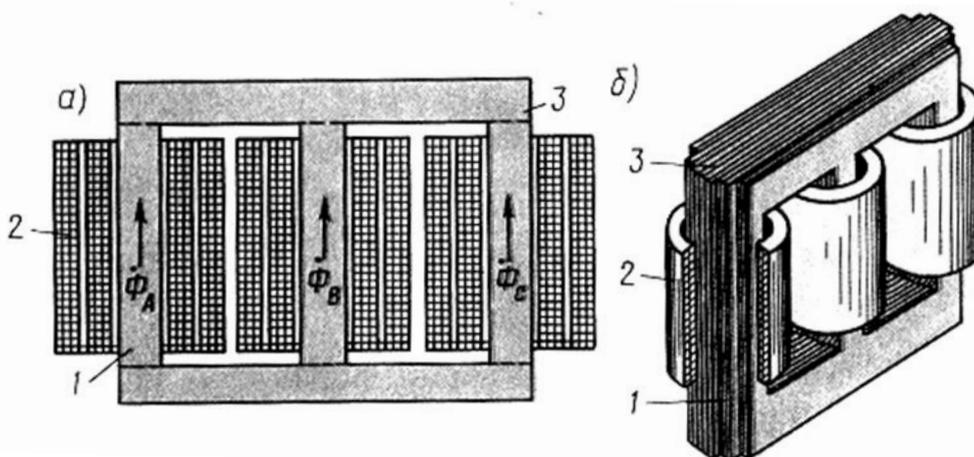


Рисунок 5.1 – Магнитопровод трехфазного трансформатора стержневого типа

По способу сочленения стержней с ярами различают стыковую и шихтованную конструкции стержневого магнитопровода рисунок 5.2.

При стыковой конструкции рисунок 5.2, а, стержни и ярма собирают раздельно, 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.

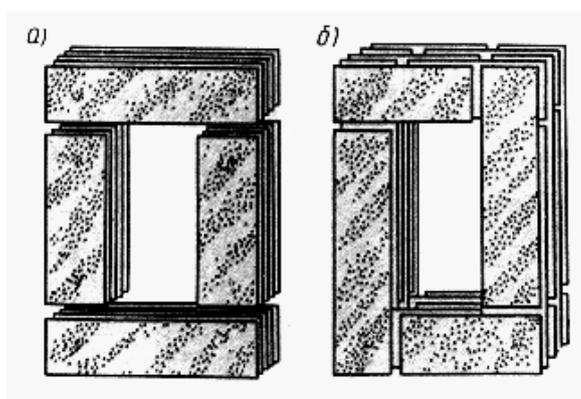


Рисунок 5.2 – Стыковая (а) и шихтованная (б) конструкции магнитопроводов

Шихтованная конструкция магнитопроводов силовых трансформаторов показана на рисунок 5.2, б, когда стержни и ярма собирают слоями в переплет. Обычно слой содержит 2...3 листа. В настоящее время магнитопроводы силовых трансформаторов изготовляют 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.

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 спрессовывают (скрепляют). Делают это обычно наложением на стержень бандажа из стекло-

ленты 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, стягивают шпильками.

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 кВА) чаще всего изготавливают из узкой ленты электротехнической холоднокатаной стали путем навивки. Такие магнитопроводы делают разрезными, а после насадки обмоток собирают встык и стягивают специальными хомутами.

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, угловым 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.

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

Концентрические обмотки в конструктивном отношении разделяют на несколько типов.

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

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. 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.

3. *Непрерывные обмотки* 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.

В трансформаторах с масляным охлаждением магнитопровод с обмотками помещен в бак, наполненный трансформаторным маслом рисунок 5.3.

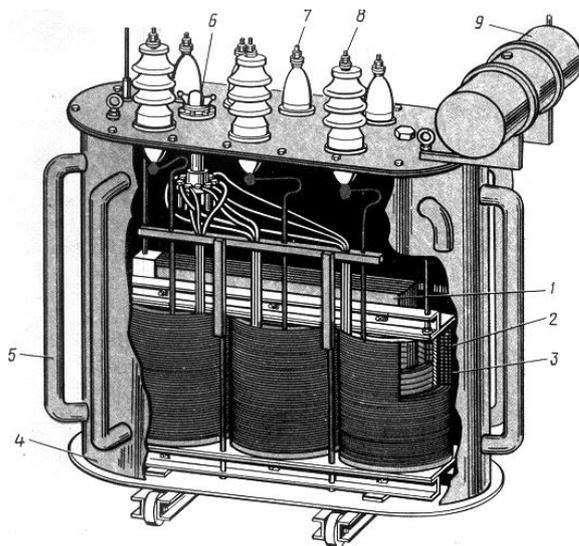


Рисунок 5.3 – Устройство трансформатора с масляным охлаждением

Трансформаторное масло, омывая обмотки 2 и 3 и магнитопровод 1, отбирает от них тепло 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.

В трансформаторах мощностью до 20...30 кВА 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 кВА 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 ломается 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 прикреплен тележка, позволяющая перемещать трансформатор в пределах подстанции. На крышке бака расположена рукоятка переключателя напряжений 6.

5.3. Принцип действия трансформаторов

Простейший силовой трансформатор состоит из магнитопровода (сердечника), выполненного из ферромагнитного материала (обычная листовая электротехническая сталь), и двух обмоток, расположенных на стержнях магнитопровода рисунок 5.4, 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_n . 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.

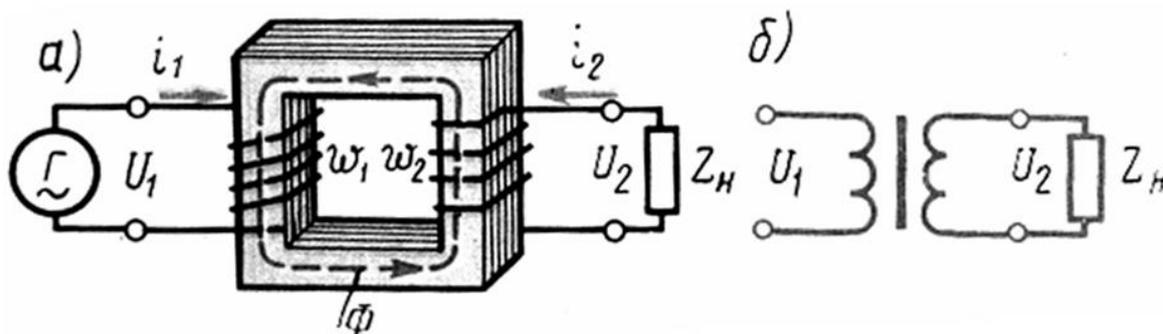


Рисунок 5.4 – Электромагнитная (а) и принципиальная (б) схемы трансформатора

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки к источнику переменного тока в витках этой обмотки протекает переменный ток i_1 , 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

$$e_1 = -\omega_1(d\Phi/dt),$$

во вторичной обмотке ЭДС взаимной индукции

$$e_2 = -\omega_2(d\Phi/dt).$$

где ω_1 и ω_2 - число витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

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

Из рисунка 5.4, а, видно, что ЭДС e_1 и e_2 , наводимые в обмотках трансформатора, отличаются друг от друга лишь за счет разного числа витков ω_1 и ω_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 рисунке 5.4, 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.

Свойства трансформатора определяются его *номинальными параметрами*:

- номинальное первичное линейное напряжение $U_{1ном}$, В;
- номинальное вторичное линейное напряжение $U_{2ном}$ (напряжение на выводах вторичной обмотки при отключенной нагрузке и номинальном первичном напряжении), В;
- номинальные линейные токи в первичной $I_{1ном}$ и вторичной $I_{2ном}$ обмотках, А;
- номинальная полная мощность $S_{ном}$, кВ·А (для однофазного трансформатора $S_{ном} = U_{1ном} \cdot I_{1ном}$, для трехфазного $S_{ном} = \sqrt{3} U_{1ном} \cdot I_{1ном}$).

Номинальные линейные токи вычисляют по номинальной мощности трансформатора.

Для трехфазного трансформатора:

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

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

Каждый трансформатор рассчитан для включения в сеть переменного тока определенной частоты. В России 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 1000 Гц.

Отношение мгновенных и действующих ЭДС в обмотках определяются выражением:

$$E_1/E_2=e_1/e_2=w_1/w_2$$

Если пренебречь падениями напряжения в обмотках трансформатора, которые обычно не превышают 3...5% от номинальных значений напряжений U_1 , и U_2 , и считать $E_1 \approx U_1$ и $E_2 \approx U_2$, то получим

$$U_1 / U_2 \approx w_1 / w_2$$

Следовательно, *подбирая соответствующим образом числа витков обмоток, при заданном напряжении U_1 можно получить желаемое напряжение U_2* . Если необходимо повысить вторичное напряжение, то число витков w_2 берут больше числа w_1 ; такой трансформатор называют *повышающим*. Если требуется уменьшить напряжение U_2 , то число витков w_2 , берут меньшим w_1 , такой трансформатор называют *понижающим*.

Коэффициент трансформации. Отношение ЭДС $E_{вн}$, обмотки высшего напряжения к ЭДС $E_{нн}$ обмотки низшего напряжения (или отношение их чисел витков) называют *коэффициентом трансформации*:

$$k = E_{вн} / E_{нн} = w_{вн} / w_{нн}$$

Коэффициент k всегда больше единицы.

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

В трансформаторе преобразуются только напряжения и токи. Мощность остается приблизительно постоянной (она несколько уменьшается из-за внутренних потерь энергии в трансформаторе). Следовательно,

$$I_1 / I_2 \approx U_2 / U_1 \approx w_1 / w_2$$

При увеличении вторичного напряжения трансформатора в k раз по сравнению с первичным ток i_2 во вторичной обмотке соответственно уменьшается в k раз.

Трансформатор может работать только в цепях переменного тока. Если первичную обмотку трансформатора подключить к источнику постоянного тока, то в его магнитопроводе образуется магнитный поток, постоянный во

времени по величине и направлению. Поэтому в первичной и вторичной обмотках в установившемся режиме не индуцируются ЭДС, а следовательно, не передается электрическая энергия из первичной цепи во вторичную. Такой режим опасен для трансформатора, так как из-за отсутствия ЭДС E , в первичной обмотке ток $I_1 = U_1/R_1$, весьма большой.

5.3. Модификации трансформаторов

5.3.1. Трехобмоточные трансформаторы

В трехобмоточном трансформаторе на каждую трансформируемую фазу приходится три обмотки. За номинальную мощность такого трансформатора принимают номинальную мощность наиболее нагружаемой его обмотки. Токи, напряжения и сопротивления других обмоток приводят к числу витков этой, наиболее мощной обмотки. Принцип работы трехобмоточного трансформатора по существу не отличается от принципа работы обычного двухобмоточного трансформатора.

Существуют трехобмоточные трансформаторы с одной первичной и двумя вторичными обмотками и трансформаторы с двумя первичными и одной вторичной обмотками. Обмотки трехобмоточного трансформатора располагают на стержне обычно концентрически рисунок 5.5, при этом целесообразнее двустороннее расположение вторичных обмоток относительно первичной, тогда первичной является обмотка 2, а вторичными – обмотки 1 и 3. В этом случае взаимное влияние вторичных обмоток заметно ослабевает.

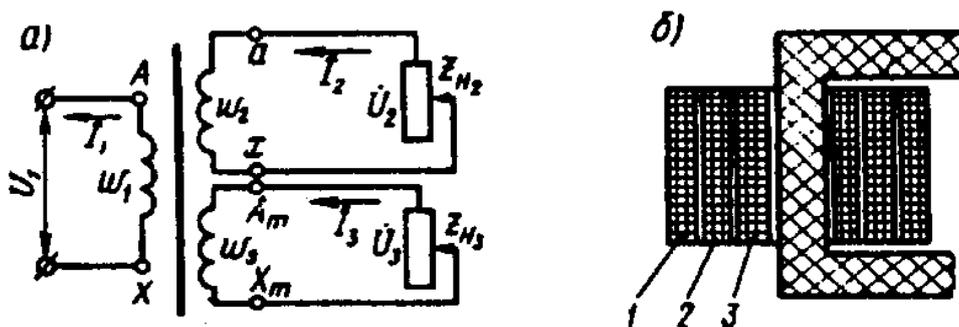


Рисунок 5.5 – Трехобмоточный трансформатор с одной первичной и двумя вторичными обмотками

На крупных электростанциях иногда применяют трехобмоточные трансформаторы с двумя первичными обмотками (к каждой из них подключается генератор) и одной вторичной (от нее отходит линия электропередачи). Обычно это установки большой мощности, а поэтому в них применяют однофазные трехобмоточные трансформаторы, соединенные в трансформаторную группу.

5.3.2. 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 w_{Ax} соединяют с выводом *a* обмотки w_{ax} рисунок 5.6. Если выводы *Ax* подключить к сети, а к выводам *ax* подключить нагрузку Z_H , то получим *понижающий* автотрансформатор. Если же выводы *ax* подключить к сети, а к выводам *Ax* подключить нагрузку Z_H , то получим *повышающий* автотрансформатор.

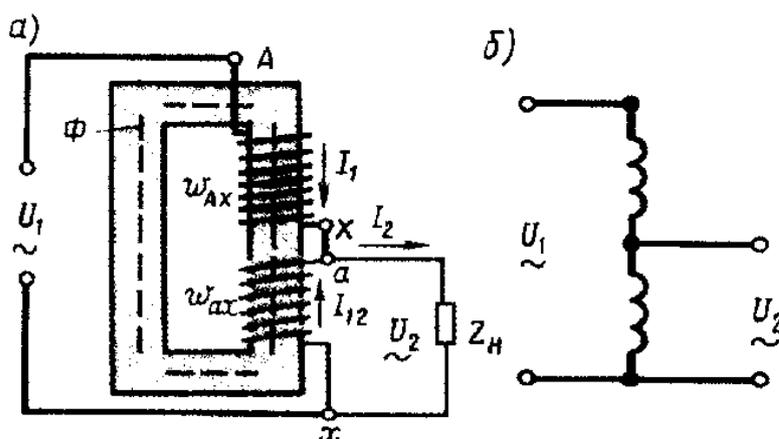


Рисунок 5.6 – Электромагнитная (а) и принципиальная (б) схемы однофазного понижающего автотрансформатора

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* рисунок 5.6, *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. 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.

Широко распространены *автотрансформаторы с переменным коэффициентом трансформации*. В этом случае автотрансформатор снабжают устройством, позволяющим регулировать величину 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 трансформаторы, называемые регуляторами напряжения, могут быть однофазными и трехфазными.

5.3.3. Трансформаторы для дуговой электросварки

Трансформатор для дуговой электросварки, обычно называемый сарочным 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 *Др* рисунок

5.7, а, представляющего собой катушку из медного провода прямоугольного сечения, расположенную на стальном магнитопроводе.

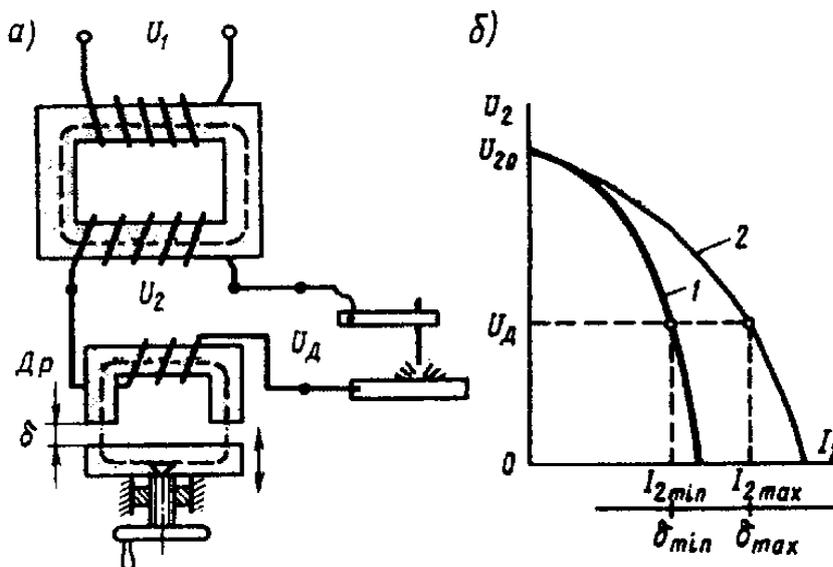


Рисунок 5.7 – Схемы включения (а) и внешние характеристики (б) трансформатора для электродуговой сварки

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 $\delta = \delta_{max}$. При этом минимальному значению δ соответствует наибольшее индуктивное сопротивление дросселя, а следовательно, минимальное значение рабочего тока $I_2 = I_{2min}$, а максимальному значению $\delta = \delta_{max}$ - наименьшее индуктивное сопротивление дросселя и максимальное значение рабочего тока $I_2 = I_{2max}$. Повышенное индуктивное сопротивление обмоток и наличие дросселя Dr обеспечивают сварочному трансформатору круто падающие внешние характеристики $U_2=f(I_2)$, необходимые для устойчивого горения электрической дуги рисунок 5.7, б. Изменяя величину воздушного зазора δ в дросселе Dr 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 $U_d \approx 30$ 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.

6 ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО МОЩНОСТИ

В техническом паспорте асинхронного электродвигателя указывается режим работы:

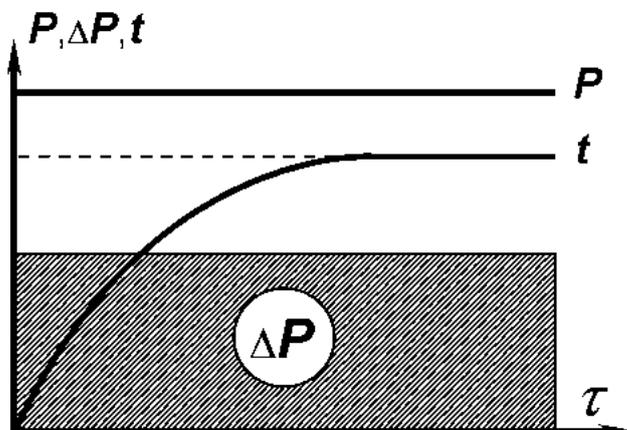


Рисунок 6.1 – График продолжительного режима работы (S1)

$S1$ - продолжительный номинальный рисунок 6.1; $S2$ – кратковременный номинальный; $S3$ - повторно-кратковременный номинальный. $S1 - S3$ - это основные режимы работы электродвигателя; имеются еще и перемежающиеся ($S4, S5, S6, S7, S8$).

Продолжительный режим ($S1$) характеризуется тем, что температура всех частей электродвигателя при работе с номинальной постоянной нагрузкой достигает установившегося значения.

Температуру считают установившейся, если в течение часа работы она увеличивается не более чем на 1° .

Кратковременный режим ($S2$) характеризуется тем, что в рабочий период температура двигателя не успевает достигнуть установившегося значения, а пауза столь продолжительна, что температура снижается до температуры окружающей среды.

В кратковременном режиме работают специальные электродвигатели, в паспорте которых указаны кратковременные мощности P_k и время τ , в течение которого двигатель может работать при данной мощности (10, 30, 60, 90 мин).

Повторно-кратковременный режим ($S3$) характеризуется тем, что периоды нагрузки чередуются с паузами. При этом за время работы электродвигатель не успевает нагреться до установленной температуры, а за время отключения электродвигатель не успевает охладиться до температуры окружающей среды.

Повторно-кратковременный режим характеризуется коэффициентом относительной продолжительности включения:

$$\varepsilon = \frac{\tau_p}{\tau_p + \tau_n} = \frac{\tau_p}{\tau_c};$$

или в процентах

$$ПВ\% = \varepsilon \cdot 100\%$$

где: τ_p , τ_n , τ_c - соответственно периоды работы, паузы и цикла; **ПВ%** - продолжительность включения, %.

Электротехническая промышленность выпускает специальные электродвигатели, предназначенные для работы в режиме S3 со стандартным ПВ % 15, 25, 40 и 60 – с продолжительностью работы 10 мин.

Во всех случаях выбор электродвигателя по мощности осуществляется по нагрузочной диаграмме. Если нагрузка электродвигателя существенно меньше номинальной, он недоиспользуется по мощности, что свидетельствует об излишних капитальных вложениях, его КПД и $\cos\phi$ заметно снижаются. Если же нагрузка на валу двигателя превышает номинальную, то это приводит к возрастанию тока в его обмотках, перегреву электродвигателя и к сокращению срока службы.

В режиме S1 двигатель может работать с постоянной или переменной нагрузкой. В этом случае целесообразно выбирать двигатель, у которого в техническом паспорте проставлен индекс S1. Выбор мощности двигателя для продолжительной постоянной нагрузки (вентиляторы, насосы, транспортеры с постоянной загрузкой и т.п.) очень прост. По известной мощности P_m рассчитывают мощность двигателя:

$$P_d = \frac{P_m}{\eta_m \cdot \eta_n},$$

где η_m и η_n - КПД машины и передачи.

Например, мощность двигателя для привода вентилятора:

$$P_B = \frac{Q \cdot H}{\eta_e \cdot \eta_n},$$

где Q - производительность вентилятора, м³/с; H - напор вентилятора, Па; η_m и η_n - КПД машины и передачи.

Выбор мощности двигателя для продолжительной переменной нагрузки осуществляется методом определения эквивалентных величин I_e ; M_e или P_e .

В зависимости от наличия нагрузочной диаграммы:

$$I = f(\tau); M = f(\tau); P = f(\tau).$$

На рис 10.2. нагрузочная диаграмма представлена изменением мощности в этом случае определяют эквивалентную по нагреву мощность нагрузки на валу электродвигателя по выражению как

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n P_i^2 \cdot t_i}{\sum_1^n t_i}}, \quad (6.1)$$

где P_i - мощность на валу электродвигателя в i -й период работы, кВт; τ_i - продолжительность i -го периода работы, мин; n - количество периодов нагрузки.

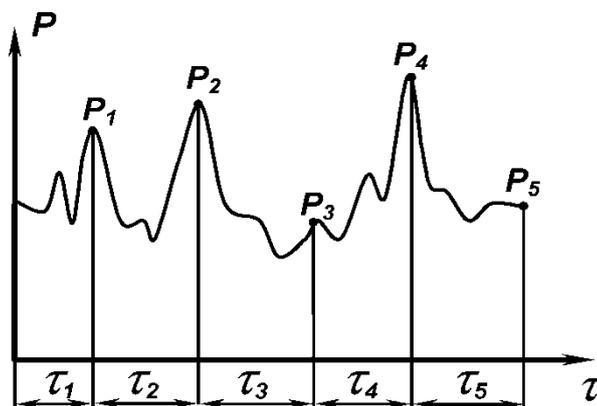


Рисунок 6.2 – График изменения мощность на приводном валу рабочей машины (нагрузочная диаграмма)

Мощность электродвигателя при его полном охлаждении во время паузы в работе выбирают по каталогу исходя из условия.

$$P_n \geq \frac{P_{\text{э}}}{p_m}, \quad (6.2)$$

где P_n - номинальная мощность электродвигателя, кВт;

p_m - коэффициент механической перегрузки.

Коэффициент механической перегрузки p_m - определяется через коэффициент тепловой перегрузки двигателя p_m :

$$p_m = \sqrt{p_m}, \quad (6.3)$$

$$p_m = \frac{1}{1 - e^{-t_p / T_n}}, \quad (6.4)$$

где: t_p - полная продолжительность работы электродвигателя с переменной нагрузкой, мин; T_n - постоянная времени нагрева электродвигателя, мин.

Постоянную времени нагрева T_n принять для ориентировочного выбора мощности электродвигателя можно принять равной $T_n = 90$ мин.

Анализируя (6.3), (6.4), можно установить, что при $t_p \geq 90$ мин $p_m=1$, а следовательно, и $p_m = 1$.

Поэтому в практике двигатель выбирают по условию $P_n \geq P_{\varepsilon}$. Во всех случаях выбора электродвигателя по мощности его проверяют по пусковому моменту и перегрузочной способности

$$M_n \geq \frac{M_{\text{пуск}}}{\mu_{\text{пуск}}}, \quad M_n \geq \frac{M_{\text{max}}}{\mu_{\text{max}}},$$

где $\mu_{\text{пуск}}$, μ_{max} - коэффициент кратности пускового и максимального моментов выбранного двигателя.

Для электроприводов, работающих в режиме $S2$, нецелесообразно выбирать двигатели, предназначенные для работы в режиме $S1$. В этом случае двигатель необходимо выбирать по специальным каталогам, в которых указывается кратковременная мощность.

Для электроприводов, работающих в режиме $S3$, целесообразно применять электродвигатели, предназначенные для повторно-кратковременного режима. Если относительная продолжительность работы отличается от стандартной, делают пересчет по выражению:

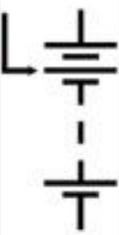
$$P_{ct} = P \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ct}}},$$

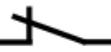
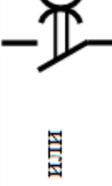
где P , ε - мощность и относительная продолжительность работы машины; ε_{ct} - стандартная продолжительность работы.

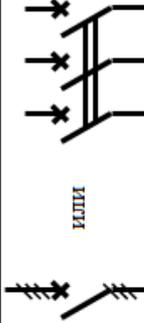
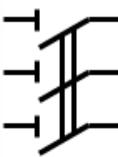
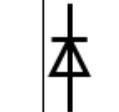
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

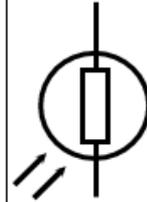
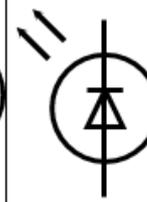
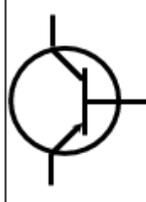
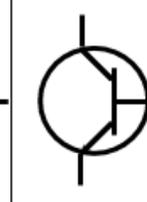
1. Механические характеристики рабочих машин и электродвигателей.
2. Классификация электрических машин используемых в электроприводах.
3. Принцип действия генератора и двигателя постоянного тока.
4. Устройство машины постоянного тока. Способы возбуждения машин постоянного тока.
5. Пуск двигателя параллельного возбуждения.
6. Регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.
7. Технический паспорт и типы электродвигателей.
8. Расчет основных электромеханических параметров по паспортным данным.
9. Маркировка выводов. Схемы включения. Маркировка выводов обмотки статора.
10. Пуск двигателей с короткозамкнутым ротором.
11. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей.
12. Электропривод с однофазным двигателем. Работа трехфазного асинхронного двигателя от однофазной сети.
13. Устройство, принцип действия синхронных машин.
14. Типы синхронных машин и их устройство. Пуск синхронных двигателей.
15. Назначение трансформаторов. Классификация трансформаторов.
16. Устройство трансформаторов. Принцип действия трансформаторов.
17. Трехобмоточные трансформаторы. Автотрансформаторы.
18. Трансформаторы для дуговой электросварки.
19. Выбор электродвигателя по мощности.

ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ИХ УСЛОВНОЕ ГРАФИЧЕСКОЕ
ИЗОБРАЖЕНИЕ ПО ГОСТУ

Обозначение	Наименование	ГОСТ
3 ~ 50 Гц 220 В	Переменный ток, трехфазный, частотой 50 Гц, напряжением 220 В	ГОСТ 2.721-74
3N ~ 50 Гц 220/380 В	Переменный ток, трехфазный, четырехпроводная линия (три провода, нейтраль) частотой 50 Гц, напряжением 220/380 В	ГОСТ 2.721-74
3NPE ~ 50 Гц 220/380 В	Переменный ток, трехфазный, пятипроводная линия (три провода фаз, нейтраль, один провод защитный с заземлением) частотой 50 Гц, напряжением 220/380 В	ГОСТ 2.721-74
3PEN ~ 50 Гц 220/380 В	Переменный ток, трехфазный, четырехпроводная линия (три провода фаз, один провод защитный с заземлением, выполняющий функцию нейтрали) частотой 50 Гц, напряжением 220/380 В	ГОСТ 2.721-74
	Гальванический элемент (первичный или вторичный)	ГОСТ 2.768-90
	Батарея, состоящая из гальванических элементов	ГОСТ 2.768-90
8В 10В 	Батарея с отводами от элементов	ГОСТ 2.768-90
	Батарея, состоящая из гальванических элементов с переключаемым отводом	ГОСТ 2.768-90
	Контакт замыкающий	ГОСТ 2.755-87

Обозначение	Наименование	ГОСТ
	Контакт размыкающий	ГОСТ 2.755-87
	Контакт переключающий	ГОСТ 2.755-87
	Контакт переключающий, с нейтральным центральным положением	ГОСТ 2.755-87
	Контакт, чувствительный к температуре (термоконтакт)	
	1) замыкающий	ГОСТ 2.755-87
	2) размыкающий	ГОСТ 2.755-87
	Контакт, замыкающий с замедлением, действующим:	
	1) при срабатывании	ГОСТ 2.755-87
	2) при возврате	ГОСТ 2.755-87
	3) при срабатывании и при возврате	ГОСТ 2.755-87

Обозначение	Наименование	ГОСТ
	Контакт, замыкающий выключателя 1) однополюсный	ГОСТ 2.755-87
	2) трехполюсный	ГОСТ 2.755-87
	Контакт, замыкающий выключателя трехполюсного с автоматическим срабатыванием максимального тока	ГОСТ 2.755-87
	Разъединитель трехполюсный (рубильник)	ГОСТ 2.755-87
	Выключатель концевой с двумя отдельными цепями	ГОСТ 2.755-87
	Выключатель кнопочный нажимной:	
	1) с замыкающим контактом	ГОСТ 2.755-74
	2) с размыкающим контактом	ГОСТ 2.755-74
	Диод	ГОСТ 2.730-73

Обозначение	Наименование	ГОСТ
	Тиристор триодный, запираемый в обратном направлении, с управлением:	
	1) по аноду	ГОСТ 2.730-73
	2) по катоду	ГОСТ 2.730-73
	Фоторезистор	ГОСТ 2.730-73
	Фотодиод	ГОСТ 2.730-73
	Светодиод	ГОСТ 2.730-73
	Транзистор:	
	1) типа PNP	ГОСТ 2.730-73
	2) типа NPN Примечание. Для упрощения на схемах допускается выполнять обозначения транзисторов в зеркальном изображении, проводить линию электрической связи от эмиттера или коллектора перпендикулярно или параллельно линии вывода базы	ГОСТ 2.730-73

БУКВЕННЫЕ КОДЫ НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННЫХ ВИДОВ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ГОСТу 2.710-81

Первая буква кода (обязательная)	Группа видов элементов	Примеры видов элементов	Двухбуквенный код
А	Устройство (общее обозначение)		
В	Преобразователи неэлектрических величин (кроме генераторов и источников питания) или наоборот аналоговые или многообразные преобразователи или датчики для указания или измерения	<p>Громкоговоритель</p> <p>Магнитострикционный элемент</p> <p>Сельсин-датчик</p> <p>Детектор ионизирующих излучений</p> <p>Сельсин-приемник</p> <p>Телефон (капсюль)</p> <p>Тепловой датчик</p> <p>Фотоэлемент</p> <p>Микрофон</p> <p>Датчик давления</p> <p>Пьезоэлемент</p> <p>Датчик частоты вращения (тахогенератор)</p> <p>Звукосниматель</p> <p>Датчик скорости</p>	<p>ВА</p> <p>ВВ</p> <p>ВС</p> <p>ВД</p> <p>ВЕ</p> <p>ВF</p> <p>ВК</p> <p>ВL</p> <p>ВМ</p> <p>ВР</p> <p>ВQ</p> <p>ВR</p> <p>ВS</p> <p>ВV</p>
С	Конденсаторы		
D	Схемы интегральные, микросборки	<p>Схема интегральная аналоговая</p> <p>Схема интегральная, цифровая, логический элемент</p> <p>Устройства хранения информации</p> <p>Устройство задержки</p>	<p>DA</p> <p>DD</p> <p>DS</p> <p>DT</p>

E	Элементы разные	Нагревательный элемент Лампа осветительная Пиропатрон	EK EL ET
F	Разрядники, предохранители, устройства защиты	Дискретный элемент защиты по току мгновенного действия Дискретный элемент защиты по току инерционного действия Предохранитель плавкий Дискретный элемент защиты по напряжению, разрядник	FA FP FU FV
G	Генераторы, источники питания	Багарея	GB
H	Устройства сигнальные	Прибор звуковой сигнализации Индикатор символьный Прибор световой сигнализации	HA HG HL
K	Реле, контакторы, пускатели	Реле токовое Реле указательное Реле электрогепловое Контактор, магнитный пускатель Реле времени Реле напряжения	KA KH KK KM KT KV
L	Катушки индуктивности, дроссели	Дроссель люминесцентного освещения	LL
M	Двигатели		
P	Приборы, измерительное оборудование	Амперметр Счетчик импульсов Частотомер Счетчик активной энергии Счетчик реактивной энергии	PA PC PF PI PK

		<p>Омметр Регистрирующий прибор Часы, измеритель времени действия Вольтметр Ваттметр</p> <p>Выключатели автоматический Короткозамыкатель Разъединитель</p> <p>Терморезистор Потенциометр Шунт измерительный Варистор</p> <p>Выключатель или переключатель Выключатель кнопочный Выключатель автоматический Выключатели, срабатывающие от различных воздействий: от температуры от уровня от давления от положения (путевой) от частоты вращения</p> <p>Трансформатор тока Электромагнитный стабилизатор Трансформатор напряжения</p> <p>Модулятор Демодулятор Дискриминатор</p>	<p>PR PS PT PV PW QF QK QS RK RP RS RU SA SB SF SK SL SP SQ SR TA TS TV UB UR UI</p>
<p>Q</p>	<p>Выключатели и разъединители в силовых цепях (энергоснабжение, питание оборудования и т. д.)</p>		
<p>R</p>	<p>Резисторы</p>		
<p>S</p>	<p>Устройства коммутационные в цепях управления, сигнализации и измерительных</p>		
<p>T</p>	<p>Трансформаторы, автотрансформаторы</p>		
<p>U</p>	<p>Устройства связи. Преобразователи электрических величин в электрические</p>		

V	Приборы электровакуумные и полупроводниковые	Преобразователь частотный, инвертор, генератор частоты, выпрямитель	UZ
W	Линии и элементы СВЧ. Антенны	Диод, стабилитрон Прибор электровакуумный Транзистор Тиристор Антенна Ответвитель Короткозамыкатель Вентиль Трансформатор, неоднородность, фазовращатель Антенноагор	VD VL VT VS WA WE WK WS WT WU
X	Соединения контактные	Токосъемник, контакт скользящий Штырь Гнездо Соединение разборное Соединитель высоко частотный	XA XP XS XT XW
Y	Устройства механические с электромагнитным приводом	Электромагнит Тормоз с электромагнитным приводом Муфта с электромагнитным приводом Электромагнитный пагон или плита	YA YB YC YH
Z	Устройства оконечные фильтры. Ограничители	Ограничитель Фильтр кварцевый	ZL ZQ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования по направлению подготовки 35.03.06 Агроинженерия (уровень бакалавриата): утв. приказом Минобрнауки России от 20 окт. 2015 г. № 1172. – Электрон. текстовые дан. // КонсультантПлюс: справ. правовая система.
2. ГОСТ 13267-73. Машины электрические вращающиеся и непосредственно соединяемые с ними неэлектрические. Высоты оси вращения и методы контроля. – Взамен ГОСТ 13267-67; введ. 1974-06-30. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 6 с.
3. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для разных климатических районов, категории размещения, условия эксплуатации с определёнными температурами и влажностью. – Введ. 1971-01-01. – М.: Сандартинформ, 2006. – 59 с.
4. ГОСТ 2.701-84. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению. – Взамен ГОСТ 2.701-76; введ. 1985-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 15 с.
5. ГОСТ 2.702-75. Правила выполнения электрических схем. – Введ. 1977-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 31 с.
6. ГОСТ 2.710-81. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. – Взамен ГОСТ 2.710-75; введ. 1981-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 12 с.
7. ГОСТ 2.721-74. Единая система конструкторской документации. Обозначения условные графические в схемах. Обозначения общего применения. – Взамен ГОСТ 2.721-68 ГОСТ 2.783-69 ГОСТ 2.750-68 ГОСТ 2.751-73; введ. 1975-06-30. – М.: Стандартиформ, 2008. – 33 с.
8. ГОСТ 2.730-73. Единая система конструкторской документации. Обозначения условные графические в схемах. Приборы полупроводниковые. – Взамен ГОСТ 2.730-68; введ. 1974-06-30. – М.: Стандартиформ, 2010. – 15 с.
9. ГОСТ 2.755-87. Единая система конструкторской документации. Обозначения условные графические в электрических схемах. Устройства коммутационные и контактные соединения. – Взамен ГОСТ 2.755-74; введ. 1988-01-01. – М.: Стандартиформ, 2004. – 11 с.
10. ГОСТ 2.768-90. Единая система конструкторской документации. Обозначения условные графические в схемах. Источники электрохимические, электротермические и тепловые. – Введ. 1992-01-01. – М.: Стандартиформ, 2004. – 5 с.

11. ГОСТ 8.417-2002. ГСИ. Единицы величин. – Взамен ГОСТ 8.417-81; введ. 2003-09-01. – М.: Стандартинформ, 2018. – 28 с.
12. Правила устройства электроустановок: утв. Приказом Минэнерго России от 08 июля 2002 г. № 204. – 7-е изд., по сост. на 13.05.2009. – СПб.: Деан, 2009. – 464 с.
13. Алексеев, В.В. Электрический привод / В.В. Алексеев, А.Е. Козярук. – М.: Академия, 2008. – 200 с.
14. Епифанов, А.П. Основы электропривода / А.П. Епифанов. – СПб.: Лань, 2008. – 192 с.
15. Ильинский, Н.Ф. Общий курс электропривода / Н.Ф. Ильинский, В.Ф. Казаченко. – М.: МЭИ, 2000. – 327 с.
16. Кабдин, Н.Е. Электропривод и электрооборудование: метод. рекомендации по изучению дисциплины и задания для выполнения контр. работы / Н.Е. Кабдин, А.А. Герасенков. – М.: Изд-во МГАУ им. В.П. Горячкина, 2002. – 34 с.
17. Электрические машины: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / М.М. Кацман. – 12-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 496 с.
18. Москаленко, В.В. Электрический привод / В.В. Москаленко. – М.: Академия, 2007. – 368 с.
19. Рычкова, Л.П. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Основы электропривода». – Иркутск: Изд-во ИрГСХА, 1997. - Ч1. - 60 с.
20. Рычкова, Л.П. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Основы электропривода». – Иркутск: Изд-во ИрГСХА, 1998. - Ч2. - 68 с.
21. Рычкова, Л.П. Практикум по основам электропривода: учеб. пособие / Л.П. Рычкова. – Иркутск: Изд-во ИрГСХА, 2002. – 100 с.
22. Чиликин, М.Г. Общий курс электропривода / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 576 с.

Боннет Вячеслав Владимирович

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Подготовка оригинал-макета Боннет В.В.

Лицензия на издательскую деятельность

ЛР № 070444 от 11.03.98 г.

Подписано в печать 25.12.19 г.

Тираж 100 экз.

Издательство Иркутского государственного
аграрного университета имени А. А. Ежевского
664038, Иркутская обл., Иркутский р-н,
пос. Молодежный