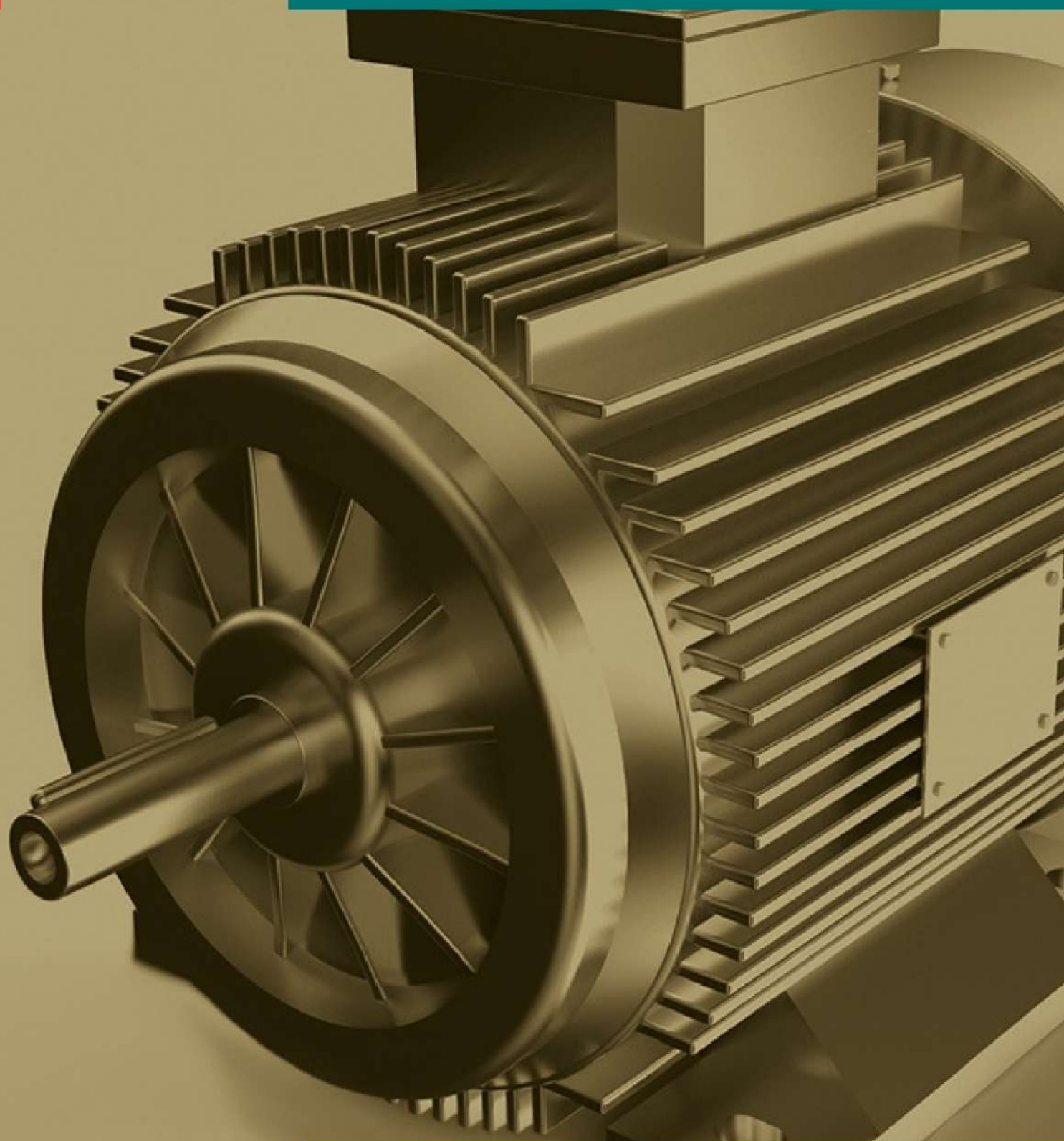


Л.В. Хоперскова

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ



Учебное пособие

Л.В. Хоперскова

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ



Учебное пособие

Волгоград
ВолгГТУ
2002

УДК 621.313

Л.В. Хоперскова. Электромеханические системы: Учебное пособие /ВолгГТУ. — Волгоград, 2002. — 69 с.

В пособии рассматриваются вопросы, связанные с изучением принципа работы и расчетами рабочих характеристик и различных электромеханических устройств.

Предназначено для студентов машиностроительных специальностей.

Ил. 19. Табл. 1. библиогр.: 8 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Волгоградского государственного технического университета.

ISBN 5-230-03704-0

Рецензенты: Н. И. Батченко

Н. Г. Лебедев

ISBN 5-230-03704-0

© Волгоградский
государственный
технический университет
2002

Введение

Электрические машины имеют чрезвычайно широкое распространение. Они применяются в различных отраслях промышленности, сельского хозяйства, в энергетике, на транспорте, морском и речном флоте, в авиации, медицине, быту и т. д. В связи с этим существует большое разнообразие электрических машин. Они различаются по принципу действия, роду потребляемого тока, мощности, частоте вращения, режимам работы. Несмотря на конструктивные различия, любая электрическая машина является электромеханическим преобразователем, который может превращать механическую энергию в электрическую или наоборот — электрическую в механическую. Те электрические машины, в которых происходит преобразование механической энергии в электрическую, называются электрическими **генераторами**, а машины, в которых совершается обратное преобразование, называются электрическими **двигателями**.

В электрической машине взаимное преобразование механической и электрической энергии может происходить в любом направлении, т. е. одна и та же машина может работать как в режиме двигателя, так и в режиме генератора. Это будет зависеть от того, какая энергия к машине подводится и какая снимается. В этом заключается принцип обратимости электрических машин. Однако для наиболее эффективного использования каждая электрическая машина, выпускаемая заводом-изготовителем, проектируется и предназначается для одного определенного режима работы (двигателем или генератором).

По роду тока электрические машины подразделяются на **машины постоянного тока** и **машины переменного тока**. Особенностью большинства машин постоянного тока является наличие у них специального механического переключающего устройства — **коллектора**. Машины переменного тока подразделяются на **асинхронные и синхронные**. В тех и других машинах возникает вращающееся магнитное поле. У асинхронных машин частота вращения ротора

отличается от частоты вращения поля, а у синхронных машин эти частоты равны.

К электрическим машинам принято относить также **трансформаторы**. Строго говоря, трансформатор не является электрической машиной, так как в нем не происходит превращение одного вида энергии в другой. В трансформаторе электрическая энергия одного напряжения преобразуется в электрическую энергию другого напряжения. При этом часть потребляемой энергии преобразуется в тепло (расходуется на нагрев сердечника и проводников обмоток). С этой точки зрения трансформатор является типичным потребителем энергии. Выбатывать энергию он не может, т. е. не является ее источником. Однако физические процессы, происходящие в трансформаторе, имеют много общего с процессами, происходящими во вращающихся электрических машинах. Изучение конструкции и основ теории трансформаторов важно не только само по себе, но и является той базой, на основе которой изучаются асинхронные и синхронные машины.

Для практического применения, правильного подключения, выбора и оптимальной эксплуатации электрических машин важно не только хорошо представлять принцип их работы, но и получать рабочие характеристики устройств, используя их паспортные данные.

Сведения об электромагнитных устройствах сосредоточены в специальных каталогах и справочниках. Кроме того, каждая электрическая машина имеет паспортную табличку, выбитую на металлической пластине и прикрепленную к корпусу. В этой табличке указаны тип машины и ее **номинальные данные**, характеризующие основные энергетические показатели и условия работы, на которые она рассчитана. К ним относятся : мощность, напряжение, частота вращения, частота переменного тока, коэффициент полезного действия (КПД), число фаз, коэффициент мощности, режим работы и т. д. Термин “номинальный” можно применять и к величинам, не приведенным в паспортной табличке, но отно-

сящимся к ее номинальному режиму, например, номинальный вращающий момент, номинальное скольжение и т. д.

Важнейшим номинальным параметром электрической машины является номинальная мощность, то есть мощность, на которую рассчитана данная машина по условиям нагревания и безаварийной работы в течение установленного срока службы. Для электрических двигателей под номинальной мощностью понимают полезную механическую мощность на валу, выраженную в ваттах или в киловаттах; для генераторов постоянного тока — полезную электрическую мощность на зажимах машины (в ваттах или киловаттах); для генераторов переменного тока — полную электрическую мощность на зажимах (в вольт-амперах или киловольт-амперах). Номинальные мощности всех видов электрических машин и трансформаторов стандартизованы; также стандартизованы номинальные частоты вращения электрических машин.

Электрические машины могут работать и при неноминальных условиях (например, пониженное или повышенное напряжение или ток, отличная от номинальной мощность и т. д.) В этих случаях энергетические показатели отличаются от паспортных данных. Например, при нагрузке трансформатора ниже оптимальной его КПД резко падает. При нагрузках больше номинальной появляется опасность чрезмерного повышения температуры частей электрической машины, в первую очередь обмоток, что может привести к преждевременному выходу из строя изоляции обмоток и, следовательно, всей машины.

Как правило, электрический двигатель представляет собой основной элемент электропривода, являясь электромеханическим преобразователем энергии. От электродвигателя механическая энергия через передаточное устройство (механическое, гидравлическое, электромагнитное) передается на исполнительный орган рабочей машины, за счет чего он и совершает механическое движение. Таким образом, и электропривод сам по себе является электромеханической системой, состоящей из электродвигательного, преобразовательного, передаточного и

управляющего устройств, предназначенной для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением. При питании электрических частей электропривода для понижения или повышения напряжения используются такие электромагнитные устройства, как трансформаторы.

Целью данного пособия является установить основные закономерности в работе электромеханических и электромагнитных преобразователей, привести основные характеристики и параметры электрических машин и трансформаторов, обрисовать круг проблем при их эксплуатации.

Пособие предназначено для студентов машиностроительных и других инженерных специальностей, обучающихся по дневной или заочной формам.

1. Расчет трехфазных трансформаторов

1.1. Назначение и области применения трансформаторов

Трансформатором называется статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного (синусоидального) тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

По особенностям конструкции и применению трансформаторы можно разделить на силовые, сварочные, измерительные и специальные. Наибольшее распространение получили силовые трансформаторы, которые являются необходимым элементом промышленной электрической сети. На электрических станциях устанавливают силовые трансформаторы, повышающие напряжение до 110, 220, 500, 750 и 1150 кВ. У потребителей напряжение понижается несколькими ступенями: на районных подстанциях до 35 (10) кВ, на подстанциях предприятий до 10 (6) кВ и, наконец, на подстанциях цехов и жилых районов — до 380/220 В. По числу фаз трансформаторы подразделяются на однофазные и трехфазные. Последние наиболее эффективны для трансформации тока в трех-

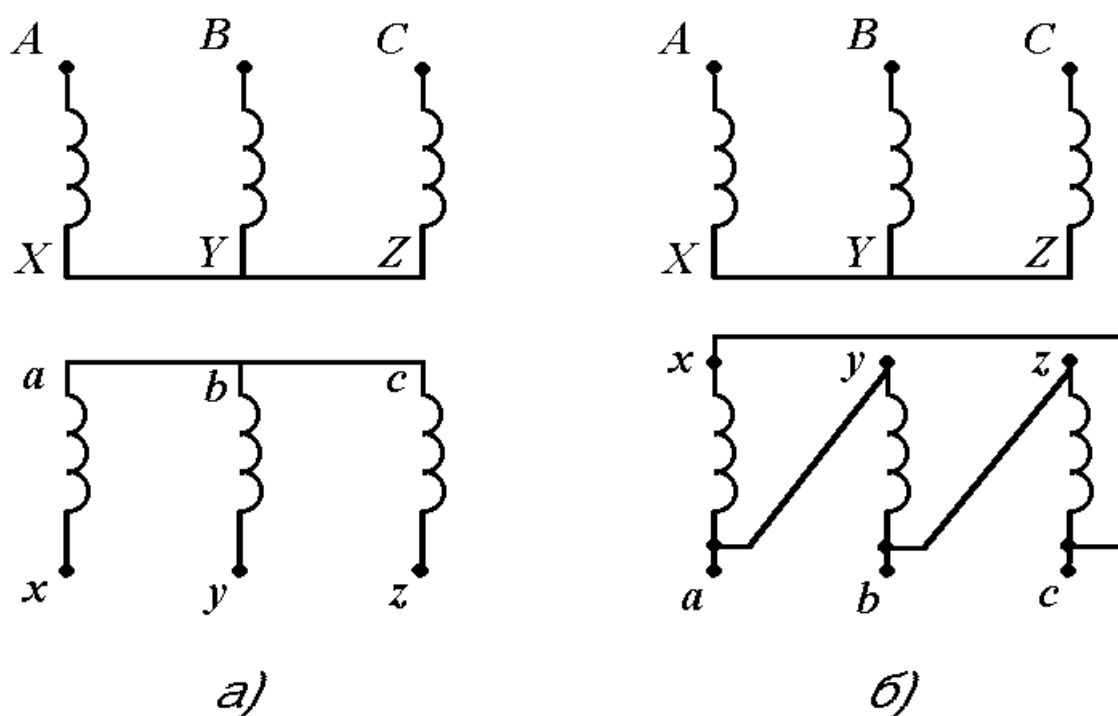


Рис. 1. Схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов:

а) по схеме Y/Y ; б) по схеме Y/Δ .

фазной сети. Каждая фаза трансформатора имеет первичную обмотку (к ней энергия подводится от источника) и вторичную обмотку (с нее энергия поступает к потребителю). Вторичных обмоток у трансформатора может быть несколько. В этом случае трансформатор называется многообмоточным. Таким образом, однофазные трансформаторы имеют как минимум две обмотки, трехфазные — шесть.

Обмотки фаз высшего (ВН) или низшего (НН) напряжений могут соединяться звездой (Y) или треугольником (Δ). Если обе обмотки соединены звездой, то такое соединение обозначается (Y/Y). В числителе указывается способ соединения обмоток фаз высшего напряжения, а в знаменателе — низшего напряжения. Начала фаз высшего напряжения обозначаются буквами A, B и C , а концы буквами X, Y, Z . Начала фаз низшего напряжения — буквами a, b и c , а их концы

— буквами x, y, z . На рис. 1 показана схема трехфазного трансформатора, обмотки которого соединены по схеме (Y/Δ).

1.2. Паспортные данные трехфазных трансформаторов

Эксплуатационные параметры трансформатора, соответствующие режиму работы, для которого он предназначен заводом-изготовителем, указываются в каталогах и на табличке, прикрепленной к корпусу. Таковыми являются:

1. Номинальная мощность $S_{ном}$. Ею является полная мощность, которая для трехфазного трансформатора определяется как $S_{ном} = \sqrt{3}U_{1л,ном}I_{1л,ном}$. Так как коэффициент полезного действия трансформатора весьма велик и в номинальном режиме, как правило, составляет 95-98%, то принято считать, что мощности первичной и вторичной обмоток равны $S_1 = S_2 = S_{ном}$.

2. Под номинальными напряжениями $U_{1л,ном}$ и $U_{2л,ном}$ понимают **линейные** напряжения каждой из обмоток. При неизменном линейном напряжении первичной обмотки напряжение вторичной обмотки будет зависеть от характера нагрузки (активный, индуктивный, емкостной). Поэтому, чтобы избежать неопределенности, за номинальное напряжение вторичной обмотки принимается напряжение при холостом ходе, когда ток вторичной обмотки равен нулю ($I_{2,л} = 0$).

По значениям номинальных напряжений может быть определен коэффициент трансформации, определяемый как отношение номинального высшего напряжения к номинальному низшему напряжению $n = U_{ВН} / U_{НН}$. Для трехфазных трансформаторов в зависимости от способа соединения обмоток определяются линейный и фазный коэффициенты трансформации. При соединении обмо-

ток по схеме “звезда – звезда” эти коэффициенты равны $n_{\text{л}} = n_{\text{ф}}$, а при соединении “звезда – треугольник” отличаются в $\sqrt{3}$ раз ($n_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot n_{\text{ф}}$)

3. Номинальными токами трансформатора — первичным $I_{1\text{л,ном}}$ и вторичным $I_{2\text{л,ном}}$ — называются линейные токи, указанные на щитке и вычисленные по номинальным значениям мощности и напряжения.

4. Частота питающего напряжения f , выраженная в Гц. Принятый стандарт промышленной частоты в России — 50 Гц.

5. Напряжение короткого замыкания, выраженное в процентах по отношению к номинальному напряжению первичной обмотки $u_k \% = \frac{U_k}{U_{1\text{ном}}} 100\%$.

6. Схема и группа соединения. Группа трансформатора определяется относительным сдвигом фаз между электродвижущими силами первичной и вторичной обмоток. В зависимости от схемы соединения обмоток (Y или Δ) и порядка соединения их начал и концов получаются различные углы сдвига фаз между линейными напряжениями. Принято сдвиг фаз между ЭДС характеризовать положением стрелок на циферблате часов, при этом вектор ЭДС обмотки высшего напряжения мысленно совмещают с минутной стрелкой часов и постоянно устанавливают на цифре 12, а вектор ЭДС обмотки низшего напряжения — с часовой стрелкой. Цифра, на которую будет ориентирована часовая стрелка, показывает группу соединения обмоток. Например, маркировка Y/Y - 6 означает, что векторы линейных ЭДС АВ и ав сдвинуты на 180° . Таким образом, в трехфазных трансформаторах может быть образовано 12 групп со сдвигом фаз ЭДС от 0 до 330° через 30° , что соответствует 12 цифрам часового циферблата. Необходимость установки группы трансформатора диктуется условиями параллельной работы трансформаторов.

7. Режим работы (продолжительный или кратковременный).

8. Полная масса.

Марка трансформатора содержит информацию о его номинальной мощности и высшем линейном напряжении. Например, марка ТСМ 60/35 указывает на то, что полная номинальная мощность составляет 60 кВА, а высшее линейное напряжение – 35 кВ.

1.3. Характеристики трансформаторов

Важнейшей эксплуатационной характеристикой любого трансформатора является внешняя — зависимость напряжения на вторичной обмотке от нагрузки при заданном напряжении на входе трансформатора. Так как именно к вторичной обмотке подключаются потребители, пониженное или повышенное по сравнению с номинальным напряжением может отрицательно сказаться на их работе.

Для построения внешней характеристики трансформатора требуется использование некоторых дополнительных параметров, характеризующих режим работы трансформатора и физические процессы, происходящие в нем.

Нагрузку определяет коэффициент нагрузки β , определяемый соотношением $\beta = I_1 / I_{1ном} = I_2 / I_{2ном}$.

При известном изменении вторичного напряжения $\Delta u\%$ при фиксированной нагрузке вторичное напряжение определяется как

$$U_2 = U_{2ном} \left(1 - \frac{\Delta u\%}{100} \right) = U_{2х} \left(1 - \frac{\Delta u\%}{100} \right).$$

Найти процентное изменение вторичного напряжения можно в каталоге или рассчитать с использованием параметров обмоток и сердечника трансформатора.

Схема замещения трехфазного трансформатора составляется на одну фазу в силу симметрии электромагнитной системы. Она моделирует процессы, происходящие в трансформаторе при различной нагрузке.

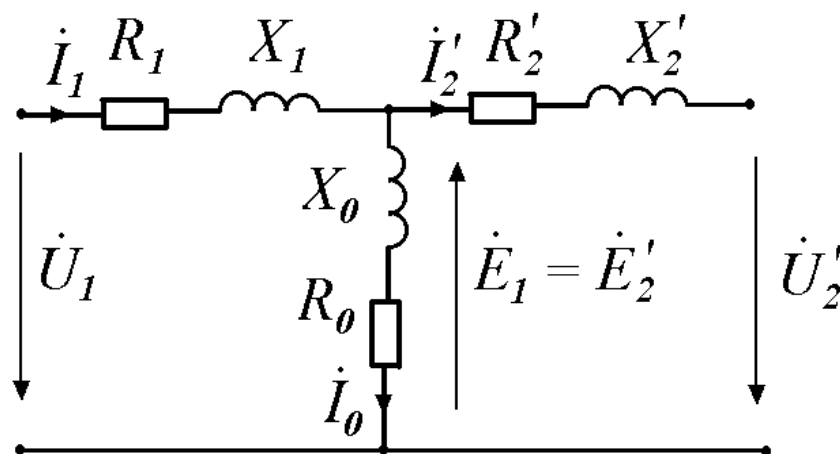


Рис. 2. Полная схема замещения фазы трехфазного трансформатора

На представленной схеме R_1 и X_1 – активное сопротивление и сопротивление рассеяния (реактивное) первичной обмотки; R_2' и X_2' – приведенные активное и реактивное сопротивление вторичной обмотки; R_0 и X_0 – активное и реактивное сопротивления ветви холостого хода, определяющие нагревание сердечника из-за вихревых токов и гистерезиса и рассеяние магнитного потока в сердечнике. Объединение обеих обмоток трансформатора при равенстве ЭДС этих обмоток ($E_1 = E_2'$) ведет к необходимости приведения параметров вторичной цепи к числу витков первичной цепи. Равенство будет выполнено, если новое число витков вторичной обмотки w_2' сделать равным числу витков первичной обмотки w_1 . Очевидно, что при таком преобразовании изменятся все величины, характеризующие вторичную цепь. Эти параметры обозначаются штрихами называются приведенными. Приведение вторичной обмотки к первичной упрощает расчет рабочих характеристик трансформатора, так как в приведенном трансформаторе величины вторичной цепи имеют тот же порядок, что и величина

ны первичной. В частности процентное изменение вторичного напряжения можно выразить через параметры обмоток следующим образом

$$\Delta u_2 \% = \beta \frac{R_k I_{ном}}{U_{ном}} 100 \cos \varphi_2 + \beta \frac{X_k I_{ном}}{U_{ном}} 100 \sin \varphi_2,$$

где R_k и X_k – активная и реактивная составляющие сопротивления обмотки трансформатора, измеренные в опыте короткого замыкания. В качестве характеристики нагрузки используется коэффициент мощности $\cos \varphi_2$. Нагрузка может быть активной ($\varphi_2 = 0$), индуктивной ($\varphi > 0_2$) или емкостной ($\varphi_2 < 0$). Схема замещения однофазного трансформатора при проведении опыта короткого замыкания приведена на рис. 3.

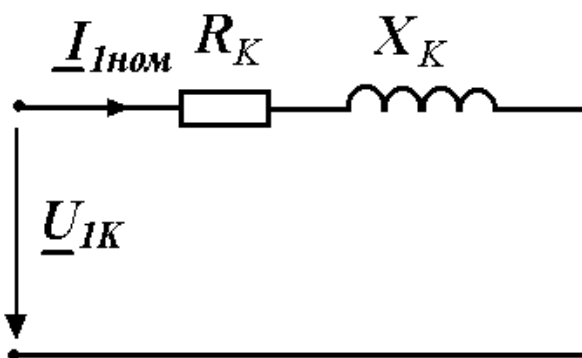


Рис. 3. Схема замещения трансформатора при проведении опыта короткого замыкания

Эта схема замещения является упрощенной, т. к. параметры сердечника трансформатора в рассмотрение не принимаются. При этом принято считать, что R_k – суммарное активное сопротивление первичной и вторичной обмоток трансформатора, X_k – суммарное реактивное сопротивление первичной и вторичной обмоток и выполняются соотношения

$$R_k = R_1 + R_2',$$

$$X_k = X_1 + X_2',$$

а полное сопротивление Z_k можно определить как $Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$ или

$$Z_k = \frac{U_{1k}}{I_{ном}}.$$

В силу того что вторичная обмотка пересчитана на число витков первичной обмотки, то обычно сопротивление приведенной вторичной обмотки принимают равным сопротивлению первичной обмотки, а тогда

$$R_1 = R_2' = R_k / 2,$$

$$X_1 = X_2' = X_k / 2.$$

Обычно U_{1k} составляет 5-8% от $U_{1ном}$:

$$u_k \% = \frac{Z_k I_{ном}}{U_{1ном}} 100.$$

Значение u_k % указано на щитке трансформатора. Активная составляющая напряжения короткого замыкания определяется выражением

$$u_{a,k} \% = \frac{R_k I_{ном}}{U_{1ном}} 100 = \frac{P_{k,ном}}{S_{ном}} 100,$$

а реактивная составляющая напряжения короткого замыкания

$$u_{p,k} \% = \frac{X_k I_{ном}}{U_{1ном}} 100.$$

Процентные значения напряжения u_k , $u_{a,k}$, $u_{p,k}$ связаны соотношением

$$u_k = \sqrt{u_{a,k}^2 + u_{p,k}^2}.$$

Тогда процентное изменение вторичного напряжения можно выразить через активную и реактивную составляющие напряжения короткого замыкания

$$\Delta u\% = \beta \cdot (u_{a,k} \cdot \cos \varphi_2 + u_{p,k} \cdot \sin \varphi_2).$$

Внешняя характеристика трансформатора может быть построена по двум точкам. Первая точка соответствует номинальному напряжению вторичной обмотки ($U_2 = U_{2ном}$) при $I_{гн\text{ом}} \frac{U_{н\text{ом}} 110}{R_k 4\pi}$, а вторая соответствует напряжению, вычисленному с использованием изменения вторичного напряжения при заданном значении $I_{\text{гн}}$ (рис. 4).

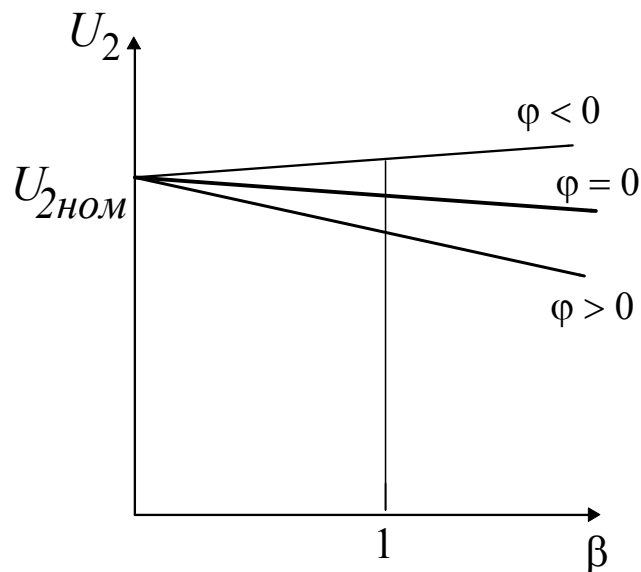


Рис. 4. Внешняя характеристика трансформатора при различном характере нагрузки

Другой важной характеристикой для трансформатора является зависимость коэффициента полезного действия от нагрузки $i_x\% = \frac{I_x}{I_{ном}}$. Как известно, КПД любого устройства определяется отношением отдаваемой мощности к потребляемой

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% .$$

Разницу между мощностями $M_c = 1,2M_{ном}$ называют полными потерями мощности. Эти потери складываются из потерь в обмотках трансформатора, определяемые как электрические $\Delta P_{эл}$, и потерь в сердечнике, определяемых как магнитные $\Delta P_{магн}$. Электрические потери относятся к переменным потерям, так как они зависят от нагрузки. Для номинального режима эту мощность можно определить экспериментально при проведении опыта короткого замыкания, так как по условиям проведения опыта токи в обеих обмотках должны соответствовать своим номинальным значениям

$$\Delta P_{эл,ном} = P_{к,ном} = R_1 I_{1ном}^2 + R_2 I_{2ном}^2 .$$

Исходя из упрощенной схемы замещения, составляемой для опыта короткого замыкания, можно принять

$$P_{к,ном} = I_{1ном}^2 R_k .$$

Учитывая, что нагрузка характеризуется коэффициентом нагрузки β , ток нагрузки можно определить как $I_2 = \beta \cdot I_{2ном}$ при одновременном изменении тока в первичной обмотке $I_1 = \beta \cdot I_{1ном}$. Тогда потери в обмотках трансформатора в зависимости от нагрузки можно представить как

$$\Delta P(\beta) = \beta^2 \cdot I_{1ном}^2 R_k = \beta \cdot P_{к,ном} .$$

Магнитные потери, или потери в сердечнике трансформатора, относятся к постоянным потерям, так как они практически не зависят от нагрузки. Постоянство этих потерь обеспечивается с одной стороны выбором такой марки стали, у которой даже при малых токах сердечник находится в режиме насыщения ($\Phi_m = const$).

С другой стороны, сердечник набирают из тонких листов стали для обеспечения минимальных потерь при образовании вихревых токов. Эти потери можно определить из опыта холостого хода. При проведении опыта холостого хода вторичная обмотка разомкнута, а к первичной подводится напряжение, равное номинальному. На рис. 5 представлена его схема замещения.

В этом случае нагрузка отсутствует $I_2 = 0$, а ток первичной обмотки, называемый током холостого хода I_x , обычно составляет около 5% от номинального тока. Часто используется процентное значение тока холостого хода – $i_x \% = \frac{I_x}{I_{1ном}}$. Измеряемая активная мощность в этом опыте является мощностью потерь в сердечнике трансформатора, так как потери в обмотках в этом режиме пренебрежимо малы. Параметры схемы замещения в режиме холостого хода:

$$R_x = R_1 + R_0 = \frac{P_x}{I_x^2},$$

$$X_x = X_1 + X_0 = \sqrt{Z_x^2 - R_x^2},$$

где $Z_x = \frac{U_{1ном}}{I_x}$.

Коэффициент мощности в опыте холостого хода определяется как

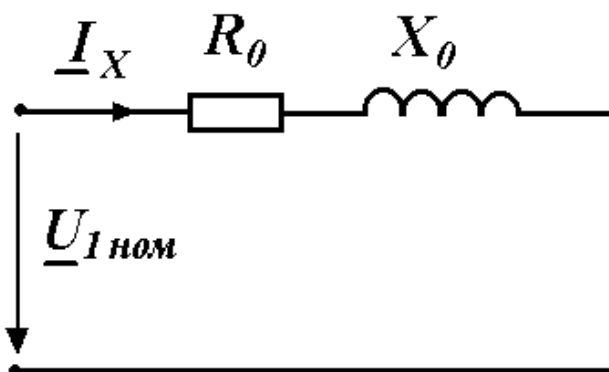


Рис. 5. Схема замещения трансформатора при проведении опыта холостого хода

$$\cos \varphi_x = \frac{P_x}{U_{1ном} I_x}.$$

Опыты холостого хода и короткого замыкания позволяют не только определить параметры схемы замещения, но и вычислить коэффициент полезного действия трансформатора. В частности

$$\Delta P(\beta) = P_x + \beta^2 \cdot P_{к,ном}.$$

Учитывая, что мощность, потребляемая нагрузкой $P_2 = \beta \cdot S_{ном} \cdot \cos \varphi_2$, коэффициент полезного действия находится по формуле

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_x + \beta^2 P_{к,ном}}.$$

Если продифференцировать это выражение и приравнять его нулю ($\frac{d\eta}{d\beta} = 0$), то получим значение β , при котором трансформатор имеет максимальный КПД, так называемый оптимальный режим

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \quad \%.$$

Для серийных трансформаторов значение оптимального коэффициента нагрузки составляет P_2 то есть наибольший КПД достигается недолуженным трансформатором. КПД трансформаторов самый высокий из электротехнических устройств и может достигать 97-99%. Зависимость ($\varphi > 0_2$) приведена на рис. 6.

Пример № 1.

Трехфазный трансформатор ТМ-63/10 имеет следующие данные: низшее напряжение $U_2 = 400$ В, потери при холостом ходе $P_x = 265$ Вт, потери при коротком замыкании $P_k = 1280$ Вт, напряжение короткого замыкания U_k составляет 5,5% от номинального значения, ток холостого хода I_k составляет 2.8% от номинального значения.

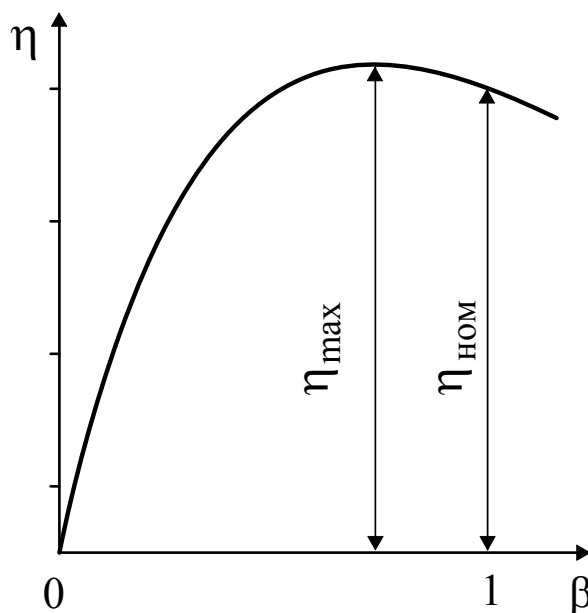


Рис. 6. Зависимость КПД трансформатора от нагрузки

Определить: а) фазные напряжения U_ϕ при группе соединения трансформатора Y/Δ ; б) фазный n_ϕ и линейный n_Δ коэффициенты трансформации; в) номинальные токи первичных и вторичных обмоток; г) КПД при нагрузке 0.5 от номинального значения и $\cos(\varphi) = 0.8$; д) активное и реактивное сопротивления фазы при коротком замыкании; е) абсолютное значение напряжения короткого замыкания; ж) процентное изменение напряжения на вторичной цепи при $\cos(\varphi) = 0.8$, индуктивном и емкостном характере нагрузки и при номинальном токе; з) напряжение во вторичной цепи, соответствующее этим нагрузкам.

Решение:

Расшифровка марки трансформатора ТМ-63/10 означает: Т — трехфазный, М — масляный, 63 кВ · А — номинальная мощность трансформатора, 10 кВ — напряжение на первичной обмотке. Знак Y/Δ означает, что первичная обмотка соединена в “звезду”, вторичная — в “треугольник”.

Согласно условиям задачи имеем $U_\Delta = 10000$ В. Так как первичная обмотка соединена “звездой”, напряжение на фазе первичной обмотки

$$M_{ст,э} = M_{э} \cdot \sqrt{\frac{ПВ \%}{ПВ_{ст,э} \%}} \text{ В.}$$

Из условия соединения вторичной обмотки “треугольником” имеем

$$U_{2\Phi} = U_{2л} = U_{2 ном} = 400 \text{ В.}$$

Коэффициент трансформации по фазе

$$n_{\Phi} = U_{1\Phi} / U_{2\Phi} = 5780 / 400 = 14,45 .$$

Линейный коэффициент трансформации

$$n_{л} = U_{1л} / U_{2л} = U_{1 ном} / U_{2 ном} = 10000 / 400 = 25.$$

Номинальный ток в первичной обмотке $I_{1 ном}$ определяем из соотношения

$$S_{ном} = \sqrt{3} U_{1 ном} I_{1 ном} ,$$

в результате

$$I_{1 ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} U_{1 ном}} = \frac{63000}{1,73 \cdot 10000} = 3,64 \text{ А.}$$

Номинальный ток вторичной обмотки при условии $S_{2 ном} \approx S_{1 ном}$

$$I_{2 ном} = \frac{S}{\sqrt{3} U_{2 ном}} = \frac{63000}{1,73 \cdot 400} = 91 \text{ А.}$$

КПД при нагрузке $0,5 P_{ном}$

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_x + \beta^2 P_k} = \frac{0,5 \cdot 63000 \cdot 0,8}{0,5 \cdot 63000 \cdot 0,8 + 265 + 0,5^2 \cdot 1280} = 0.81 ,$$

где $S_{ном}$ — номинальная мощность; P_x — потери холостого хода; P_k — потери короткого замыкания; β — коэффициент нагрузки. Абсолютное значение напряжения при коротком замыкании $U_k = 5,5\% U_{ном} = 0,055 \cdot 10000 = 550 \text{ В.}$

Активное сопротивление фазы при коротком замыкании

$$R_{\Phi} = \frac{P_k}{3I_{1к}^2} = \frac{P_k}{3I_{1 ном}^2} = \frac{1280}{3 \cdot 3,64^2} = 32,2 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление фазы

$$Z_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{I_{1\phi}} = 50,3 \text{ Ом},$$

реактивное сопротивление фазы

$$X_{\phi} = \sqrt{Z_{\phi}^2 - R_{\phi}^2} = \sqrt{50,3^2 - 32,2^2} = 38,6 \text{ Ом}.$$

Для определения процентного падения напряжения воспользуемся формулой

$$U_2 = \beta(U_a \% \cos \varphi_2 + U_p \% \cos \varphi_2).$$

Напряжение короткого замыкания можно выразить через ее составляющие:

$$U_k = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}.$$

Определим составляющие короткого замыкания: а) активная

$$U_a = \frac{P_k}{S_{ном}} 100\% = \frac{1280}{63000} 100\% = 2\% ;$$

б) реактивная

$$U_p = \sqrt{U_k^2 - U_a^2} = \sqrt{5,5^2 - 2^2} = 5,12\% .$$

Изменение напряжения на вторичной обмотке при индуктивной нагрузке

$$U_2 = \beta(U_a \% \cos \varphi_2 + U_p \% \cos \varphi_2) = 1 \cdot (2 \cdot 0,8 + 5,12 \cdot 0,6) = 4,6\% ,$$

$\cos \varphi_2 = 0,8$ соответствует

$$\sin \varphi_2 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2} = \sqrt{1 - 0,8^2} = 0,6 .$$

Падению напряжения 4.6% соответствует абсолютное значение

$$\Delta U = \frac{U_2 \% U_{2 ном}}{100} = \frac{4,6 \cdot 400}{100} = 18,4 \text{ В}.$$

Отсюда напряжение на вторичной обмотке при номинальной индуктивной нагрузке

$$U'_2 = U_2 - \Delta U = 400 - 18,4 = 381,6 \text{ В}.$$

Изменение напряжения на вторичной обмотке при емкостной нагрузке составляет

$$U_2 = \beta(U \% \cos \varphi - U_p \% \sin \varphi) = 1 \cdot (2 \cdot 0,8 - 5,12 \cdot 0,6) = -1,472\% .$$

Падению напряжения соответствует абсолютное значение

$$\Delta U = \frac{U_2 \% U_{2 \text{ ном}}}{100} = \frac{-1,472 \cdot 400}{100} = -5,888 \text{ В.}$$

Отсюда напряжение на вторичной обмотке при номинальной емкостной нагрузке составляет

$$U_2'' = U_2 - \Delta U = 400 - (-5,888) = 405,888 \text{ В.}$$

Активное сопротивление фазы при коротком замыкании

$$R_\phi = \frac{P_k}{3I_{1k}^2} = \frac{P_k}{3I_{1 \text{ ном}}^2} = \frac{1280}{3 \cdot 3,64^2} = 32,2 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление фазы

$$Z_\phi = \frac{U_{1\phi}}{3I_{1\phi}} = \frac{550}{3 \cdot 3,64} = 50,3 \text{ Ом,}$$

реактивное сопротивление фазы

$$X_\phi = \sqrt{Z_\phi^2 - R_\phi^2} = \sqrt{50,3^2 - 32,2^2} = 38,6 \text{ Ом.}$$

Для определения процентного падения напряжения воспользуемся формулой

$$U_2 = \beta(U_a \% \cos \varphi_2 + U_p \% \cos \varphi_2).$$

Напряжение короткого замыкания можно выразить через ее составляющие:

$$U_k = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}.$$

Определим составляющие короткого замыкания: а) активная

$$U_a = \frac{P_k}{S_{\text{ном}}} 100\% = \frac{1280}{63000} 100\% = 2\%;$$

б) реактивная

$$U_p = \sqrt{U_k^2 - U_a^2} = \sqrt{5,5^2 - 2^2} = 5,12\%.$$

Изменение напряжения на вторичной обмотке при индуктивной нагрузке

$$U_2 = \beta(U_a \% \cos \varphi_2 + U_p \% \cos \varphi_2) = 1 \cdot (2 \cdot 0,8 + 5,12 \cdot 0,6) = 4,6\%,$$

$\cos \varphi_2 = 0,8$ соответствует

$$\sin \varphi_2 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2} = \sqrt{1 - 0,8^2} = 0,6.$$

Падению напряжения 4.6% соответствует абсолютное значение

$$\Delta U = \frac{U_2 \% U_{2 \text{ ном}}}{100} = \frac{4,6 \cdot 400}{100} = 18,4 \text{ В.}$$

Отсюда напряжение на вторичной обмотке при номинальной индуктивной нагрузке

$$U'_2 = U_2 - \Delta U = 400 - 18,4 = 381,6 \text{ В.}$$

Изменение напряжения на вторичной обмотке при емкостной нагрузке составляет

$$U_2 = \beta(U \% \cos \varphi - U_p \% \sin \varphi) = 1 \cdot (2 \cdot 0,8 - 5,12 \cdot 0,6) = -1,472 \%.$$

Падению напряжения соответствует абсолютное значение

$$\Delta U = \frac{U_2 \% U_{2 \text{ ном}}}{100} = \frac{-1,472 \cdot 400}{100} = -5,888 \text{ В.}$$

Отсюда напряжение на вторичной обмотке при номинальной емкостной нагрузке составляет

$$U''_2 = U_2 - \Delta U = 400 - (-5,888) = 405,888 \text{ В.}$$

2. Расчет двигателей постоянного тока

2.1. Назначение и области применения двигателей постоянного тока

Машины постоянного тока используются в промышленности так же широко, как и машины переменного тока. Несмотря на то, что стоимость их выше, чем машин переменного тока, они обладают лучшими эксплуатационными характеристиками в отношении регулирования частоты вращения, пуска и допускают более высокие перегрузки. В основном машины постоянного тока используются в качестве двигателей. В связи с широким применением автоматизированного электропривода и применением тиристорных преобразователей, позво-

ляющих питать электродвигатели постоянного тока регулируемым напряжением от сети переменного тока, эти двигатели наиболее удобны в эксплуатации. Номинальные мощности машин постоянного тока составляют от долей ватт до 12 Мвт, а номинальные напряжения не превышают 1500 В. Частота вращения таких машин колеблется в широких пределах – от нескольких оборотов до нескольких тысяч оборотов в минуту. Эти устройства используются для привода различных механизмов на транспорте (электровозы, тепловозы, поезда, электромобили, на морских и речных судах), в черной металлургии (прокатные станы, транспортеры), станкостроении, в системах автоматического регулирования и т. д. Основной конструктивной особенностью, отличающей машины постоянного тока, является наличие щеточно-коллекторного аппарата, который требует тщательного ухода в эксплуатации и снижает надежность работы машины.

Двигатели постоянного тока классифицируются по способу включения обмотки возбуждения: независимого возбуждения, параллельного (шунтового) возбуждения, последовательного (сериесного) возбуждения и смешанного (компаундного) возбуждения. Принципиальные схемы этих двигателей представлены на рис. 7.

В машинах с параллельным возбуждением обмотка возбуждения присоединяется параллельно к зажимам якоря. Ток возбуждения I_e при нормальных условиях работы составляет по отношению к току якоря от 5% у машин малой мощности, до 1% у машин большой мощности. Так как обмотка возбуждения включается непосредственно под напряжение U , а ее ток во много раз меньше тока якоря, то сопротивление обмотки возбуждения $R_e = U / I_e$ должно быть относительно велико. Для регулирования тока в обмотке возбуждения последовательно с ней включается реостат – так называемый шунтовой регулятор. Для машин параллельного возбуждения характерным является относительно постоянное основное магнитное поле и его малая зависимость от нагрузки машины.

В машинах последовательного возбуждения весь ток якоря проходит через обмотку возбуждения. Последняя поэтому выполняется проводом относительно большого сечения и имеет небольшое сопротивление. В этих машинах магнитный поток изменяется в широких пределах в зависимости от изменения нагрузки.

Машины смешанного возбуждения имеют две обмотки последовательно соединенную с якорем и параллельную. В зависимости от назначения такой машины одна из обмоток является основной, имеющей относительно большой полный ток, а вторая служит лишь для относительно слабого дополнительного воздействия на главное поле машины. Таким образом, машина смешанного возбуждения может быть по своим характеристикам в основном машиной параллельного возбуждения с небольшой последовательной обмоткой или же машиной последовательного возбуждения с небольшой параллельной обмоткой (например, двигатель смешанного возбуждения с мягкой механической характеристикой). В случае смешанного возбуждения обмотки машины могут иметь согласное соединение, если оба магнитных потока от двух обмоток складываются, или встречное соединение, если их магнитные потоки вычитаются.

В машинах независимого возбуждения ток возбуждения не зависит от напряжения на зажимах якоря машины, поскольку обмотка возбуждения получает ток от независимого источника возбуждения.

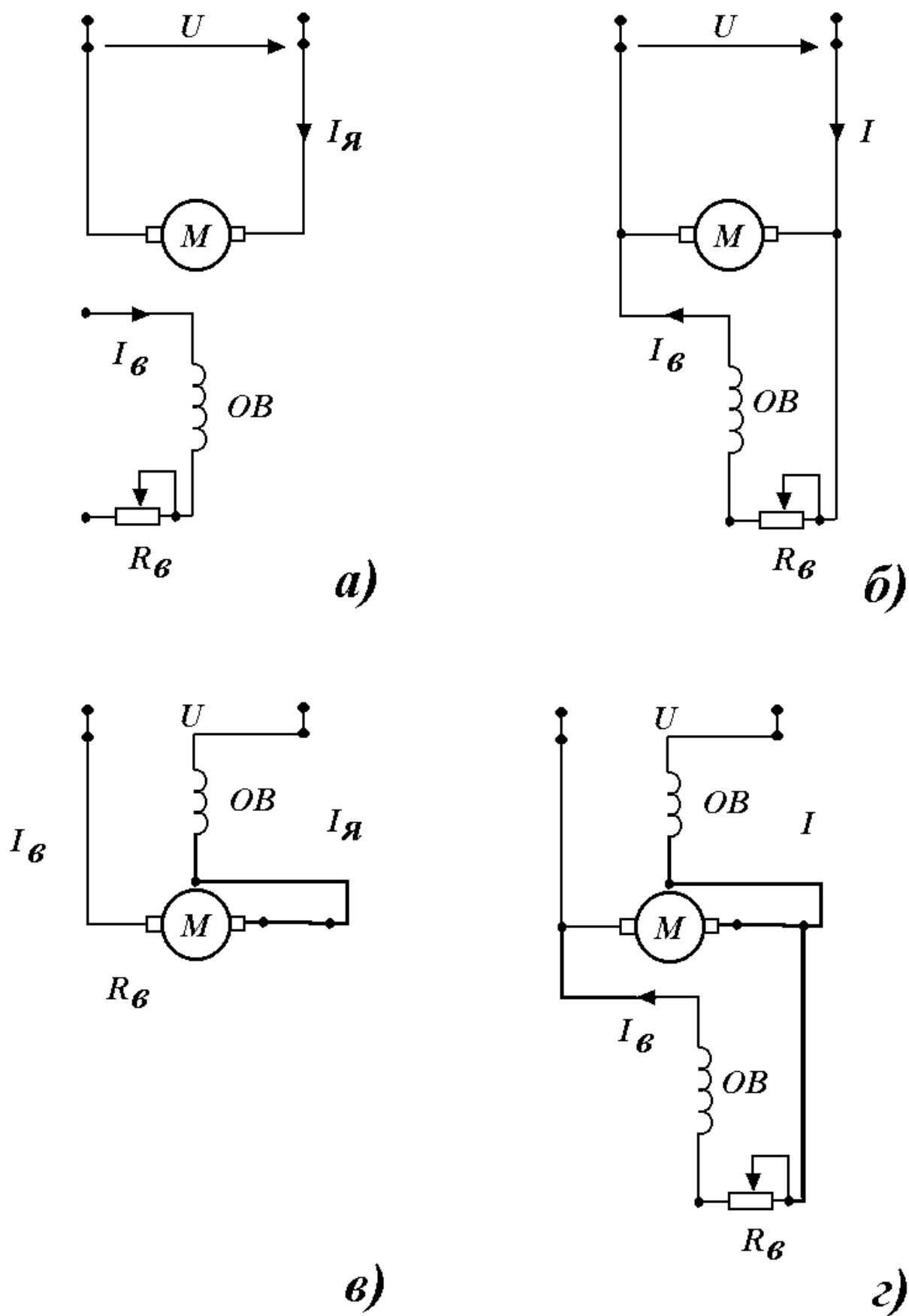


Рис. 7. Схемы двигателей постоянного тока: а) с независимым; б) параллельным ;
в) последовательным ; г) смешанным возбуждением.

По ряду свойств машины с независимым возбуждением весьма мало отличаются от машин с параллельным возбуждением. К преимуществам машин с независимым возбуждением относится возможность регулирования частоты вращения изменением питающего напряжения при фиксированном токе возбуждения.

Ток якоря I в двигателях независимого и последовательного возбуждения равен току I , потребляемому двигателем из сети, а в двигателях параллельного и смешанного возбуждения $I_{\text{я}} = I - I_{\text{в}}$ ($I_{\text{в}}$ — ток, протекающий в обмотке возбуждения).

Основные серии машин постоянного тока общего назначения — 2П и 4П. Помимо этих серий выпускаются серии краново-металлургических двигателей и серии специального назначения.

Серия 2П включает двигатели мощностью от 0,13 до 200 кВт с высотой оси вращения 90-135 мм. Для замены серии П габаритов 12-26 выпускается серия П2. Двигатели серий 2П и 4П выпускаются на напряжение 110, 220, 340 и 440 В, на номинальные частоты вращения 750, 1000, 1500, 2200 и 3000 об/мин. Машины выполняются в защищенном исполнении с самовентиляцией и независимой вентиляцией от постороннего вентилятора; в закрытом исполнении — с естественным охлаждением и наружным обдувом от постороннего вентилятора.

Двигатели серии 2П имеют независимое возбуждение и компенсационную обмотку, обеспечивающую большие кратковременные перегрузки и широкий диапазон изменения частоты вращения. А общее число модификаций двигателей постоянного тока с каждым годом возрастает. Перечислим лишь некоторые из них. Для металлургических, крановых, экскаваторных и других приводов выпускаются двигатели серии Д. Они имеют мощности от 2,5 до 185 кВт, напряжением 220 и 440 В, номинальные частоты вращения 400–1440 об/мин. Эти двигатели обладают малым моментом инерции и обеспечивают регулирование частоты вращения в широких пределах. Для электроприводов шагающих экскавато-

ров выпускаются двигатели типа МПВЭ-450-29; для привода механизма подъема и тяги – двигатель типа МПЭ-1000-630 УХЛЗ; для буровых установок – двигатель типа ДЭВ-808; для морских буровых установок в морском взрывозащищенном исполнении – двигатель типа ММП-1000-1000МЗ; серия ПЛ включает двигатели независимого возбуждения мощностью от 30 до 600 Вт, напряжением 110 и 220 В и частотой вращения 1400 и 2700 об/мин; микродвигатели постоянного тока с постоянными магнитами имеют серию ДПМ от долей ватта до десятков ватт, напряжением 12,14 и 27 В; малоинерционные исполнительные микродвигатели постоянного тока имеют якорь, выполненный в виде полого цилиндра или диска, и относятся к серии ДПР.

2.2. Паспортные данные двигателей постоянного тока

Номинальными данными для двигателей постоянного тока являются следующие:

1. За номинальную мощность двигателя принимают механическую мощность на валу $P_{ном} = P_2$ [кВт]. Эта мощность обычно указывается на щитке, закрепленном на корпусе машины.

2. Номинальное напряжение $U_{ном}$ [В].

3. Номинальная частота вращения $n_{ном}$ [об/мин].

4. Номинальный коэффициент полезного действия $\eta_{ном}$.

В справочнике по электрическим машинам также указываются:

5. Кратность пускового тока (отношение пускового тока к номинальному) $K_I = I_{II} / I_{ном}$. У серийных двигателей малой мощности кратность пускового тока допускается в пределах 5-6 при прямом пуске. У двигателей большой мощности она ограничена до 1,4–2,5. В последнем случае для ограничения пускового тока используется пусковой реостат.

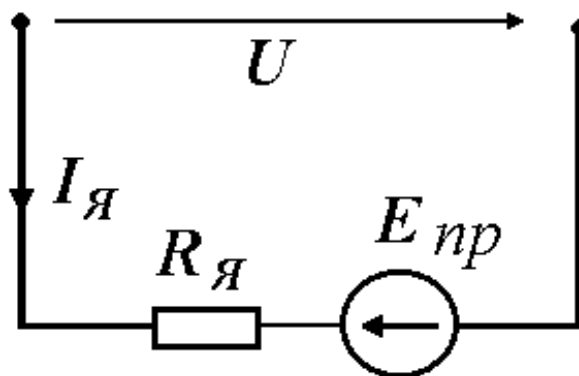


Рис. 8. Схема замещения электрической цепи двигателя постоянного тока

6. Кратность пускового момента (отношение пускового момента к номинальному) $K_M = M_{\Pi} / M_{ном}$.

2.3. Характеристики двигателей постоянного тока

У двигателей постоянного тока приложенное к якору напряжение уравновешивается наведенной в обмотке якоря электродвижущей силой и падением напряжения в цепи якоря

$$U = E + I_{я} R_{я} .$$

Это соотношение называют уравнением электрического состояния обмотки якоря двигателя постоянного тока. Падение напряжения в цепи якоря $I_{я} R_{я}$ относительно мало. В номинальном режиме (при $I_{я} = I_{я,ном}$) оно составляет 2–5% номинального напряжения. Характерным условием работы машины постоянного тока в двигательном режиме является неравенство $U > E$. В связи с этим соотношение, определяющее ток в якоре, выглядит следующим образом

$$I_{я} = \frac{U - E}{R_{я}} .$$

Вышеизложенные факты удобно представить на схеме замещения электрической цепи двигателя постоянного тока (рис. 8).

Электромагнитный момент, развиваемый двигателем, определяется взаимодействием тока обмотки якоря и магнитного поля главных полюсов. Количественное соотношение зависит от конструкции конкретного двигателя и определяется как

$$M_{эм} = C_m I_{я} \Phi,$$

где C_m — конструктивная постоянная момента, $I_{я}$ — ток якоря, Φ — основной магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, расположенной на главных полюсах. ЭДС, создаваемая в обмотке якоря и уравновешивающая приложенное напряжение, зависит от скорости изменения магнитного поля через обмотку якоря, амплитуды магнитного потока и конструкции двигателя, в частности

$$E = C_e \cdot \Phi \cdot n,$$

где C_e — конструктивная постоянная ЭДС, Φ — магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, расположенной на главных полюсах, n — частота вращения якоря, измеряемая в оборотах в минуту.

Важнейшей характеристикой двигателя постоянного тока является механическая — зависимость частоты вращения n от момента сопротивления на валу M_c при $U = const, I_{\phi} = const$. Момент сопротивления создается исполнительным механизмом, для привода которого и выбирается двигатель постоянного тока. Устойчивая работа двигателя возможна только в том случае, если выполняется равенство $M_{эм} = M_c$. Механическая характеристика показывает влияние механической нагрузки на валу двигателя на частоту вращения, что особенно важно знать при выборе и эксплуатации двигателя.

Уравнение механической характеристики можно получить, используя выражение для ЭДС обмотки якоря, уравнение электрического состояния обмотки якоря и уравнение момента. Оно выглядит следующим образом

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{C_e \cdot \Phi},$$

или

$$n = \frac{U}{C_e \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{C_e \cdot C_{\text{м}} \Phi^2} M.$$

Механическая характеристика двигателя постоянного тока представляет собой прямую. При отсутствии нагрузки (при холостом ходе), когда момент сопротивления со стороны исполнительного механизма равен нулю ($M_c = 0$), частота вращения якоря зависит от уровня приложенного напряжения, магнитного потока и конструкции двигателя. Эта частота называется частотой вращения идеального холостого хода

$$n_x = \frac{U}{C_e \cdot \Phi}.$$

При заданных номинальных параметрах двигателя $U_{\text{ном}}, I_{\text{ном}}, n_{\text{ном}}$ и неизменном магнитном потоке и токе возбуждения частота холостого хода может быть определена как

$$n_x = n_{\text{ном}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}} - I_{\text{я, ном}} R_{\text{я}}}.$$

Механическая характеристика имеет вид прямой в соответствии с уравнением $n = n_x - v \cdot M$, где $v = R_{\text{я}} / C_e \Phi$. Так как у двигателей постоянного тока сопротивление цепи якоря мало (обычно оно составляет от 0,02 до 1,1 Ом), то с увеличением нагрузки на валу частота вращения n изменяется незначительно, то есть является “жесткой”. Механическая характеристика, снятая при номинальных данных двигателя, называется естественной механической характеристикой. Она представлена на рис. 9.

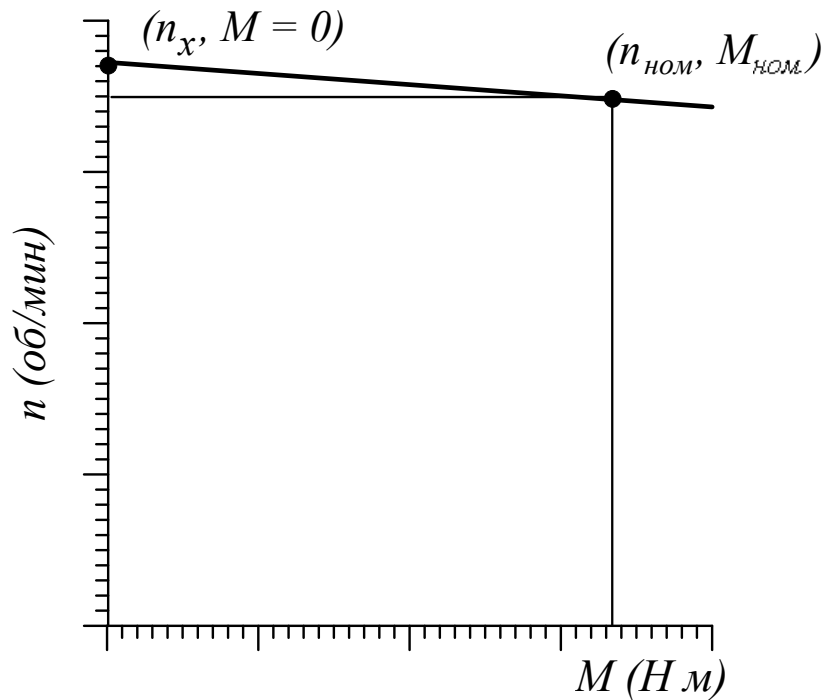


Рис. 9. Естественная механическая характеристика двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

Механическую характеристику можно построить по двум точкам, в частности $(n = n_x; M = 0)$ и $(n = n_{ном}; M = M_{ном})$. Любые другие механические характеристики, построенные для тех режимов, в которых один из параметров, входящих в уравнение естественной механической характеристики не соответствует номинальному режиму, называются искусственными.

Ток, потребляемый двигателем из сети, растет прямо пропорционально моменту сопротивления со стороны нагрузки при $\Phi = const$. То есть $I_{я} \propto M$. Изменение нагрузки со стороны исполнительного механизма ведет к изменению тока якоря в пропорции

$$\frac{M_{ном}}{M} = \frac{I_{я,ном}}{I_{я}}.$$

Увеличение тока, потребляемого двигателем, возможно не только при увеличении нагрузки. Одной из главных проблем при эксплуатации двигателей постоянного тока является проблема пуска. При прямом пуске цепь якоря включа-

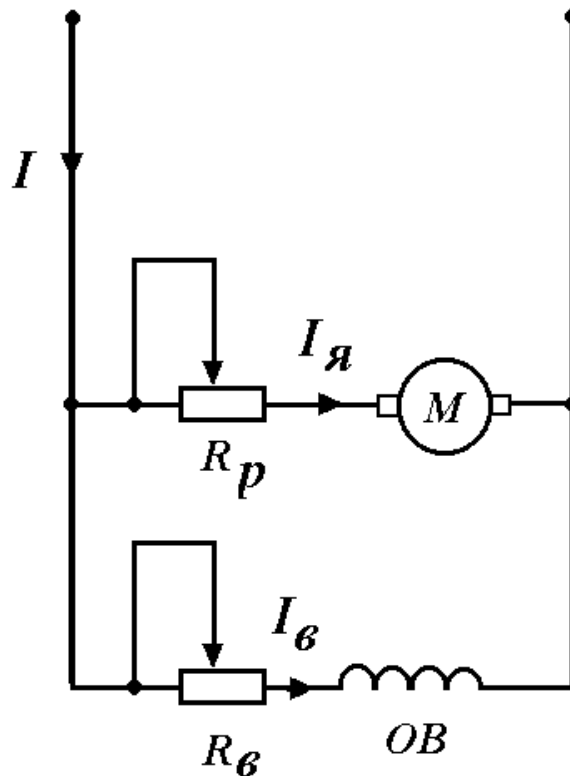


Рис. 10. Схема двигателя параллельного возбуждения

ется сразу на полное напряжение. Так как в момент пуска якорь неподвижен ($n = 0$), то противо-ЭДС отсутствует и пусковой ток резко возрастает

$$I_{я,n} = \frac{U}{R_{я}},$$

а при малых значениях $R_{я}$ пусковой ток превышает номинальный в 50-100 раз, что недопустимо как для сети, так и для самого двигателя. Такой способ пуска применяется только для двигателей малой мощности, где $I_{я,n} \leq (4 - 6)I_{ном}$. Двигатели средней и большой мощности запускают при включении добавочного сопротивления (пускового реостата) в цепь обмотки якоря. Пусковой ток в этом случае равен

$$I_{я,n} = \frac{U}{R_{я} + R_n}.$$

Сопротивление $R_n = U / I_{я,n} - R_я$ выбирают таким, чтобы в момент пуска, когда противо-ЭДС равна нулю, ток якоря не превосходил значений $1,4-2,5 I_{ном}$. По мере разгона якоря возрастает противо-ЭДС ($E = C_e n \Phi$), а сопротивление реостата выводится.

К пуску двигателя предъявляются два основных требования: необходимый для трогания с места и разгона якоря вращающий момент и не допустить при пуске протекания через обмотку якоря чрезмерно большого тока, опасного для двигателя. Практически возможны три способа пуска: прямой пуск, пуск при включении реостата в цепь якоря и пуск при пониженном напряжении в цепи якоря. Последний способ пуска возможен при питании двигателя от отдельного источника (генератора, выпрямителя) с регулируемым напряжением. Ограничение пускового тока и плавный разгон двигателя обеспечивается постепенным повышением напряжения от нуля до требуемого значения. Это находит применение в системах управления и регулирования мощных двигателей постоянного тока.

Регулирование частоты вращения можно осуществлять тремя способами:

- изменением магнитного потока (полюсное регулирование);
- введением добавочного сопротивления в цепь обмотки якоря (реостатное регулирование);
- изменением напряжения питания (якорное регулирование).

Первый способ регулирования наиболее распространен и осуществляется посредством регулирования тока в обмотке возбуждения. Это происходит при варьировании сопротивления регулировочного резистора в контуре возбуждения. При этом механические характеристики имеют вид, представленных на рис. 11.

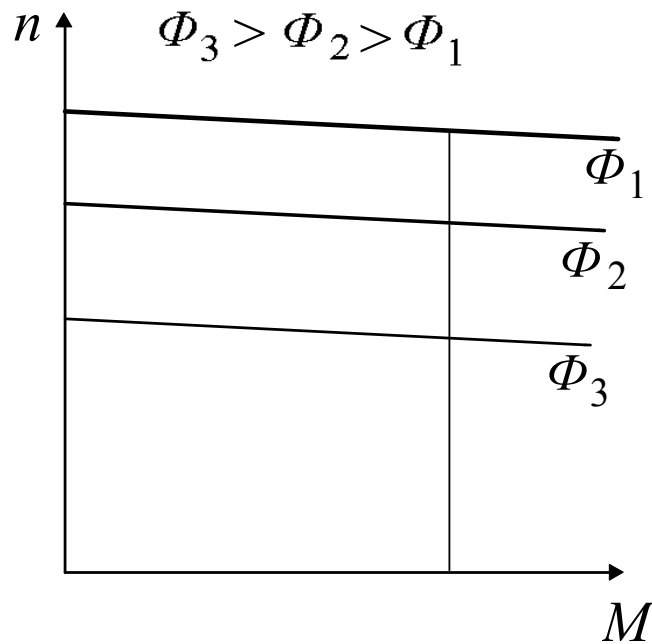


Рис. 11. Механические характеристики при полюсном регулировании.

Таким способом можно регулировать частоту вращения в пределах 1:1,5; 1:2. Глубокое уменьшение потока недопустимо, так как при нагрузке поле, создаваемое обмоткой якоря (так называемая реакция якоря), будет “опрокидывать” поле возбуждения, что приведет к неустойчивой работе двигателя. Увеличение потока в обычных двигателях параллельного возбуждения нецелесообразно, так как магнитная система двигателей насыщена (рис. 12). Частота холостого хода и частота вращения якоря в этом случае определяются следующим образом

$$n'_x = n_{x,ном} \cdot \frac{\Phi_{ном}}{\Phi'}; \quad n' = n_{ном} \cdot \frac{U - I_{я} R_{я}}{U_{ном} - I_{я,ном} R_{я}} \cdot \frac{\Phi_{ном}}{\Phi'}.$$

При этом увеличение тока возбуждения будет приводить к увеличению потерь, а значит, и к уменьшению коэффициента полезного действия. При увеличении массы двигателя и принятия специальных мер можно увеличить пределы частоты вращения в ненасыщенных двигателях до 1:5. Хотя этот способ обеспечивает сравнительно небольшие пределы регулирования частоты вращения, он является экономичным и находит широкое применение, когда пределы изменения частоты вращения небольшие.

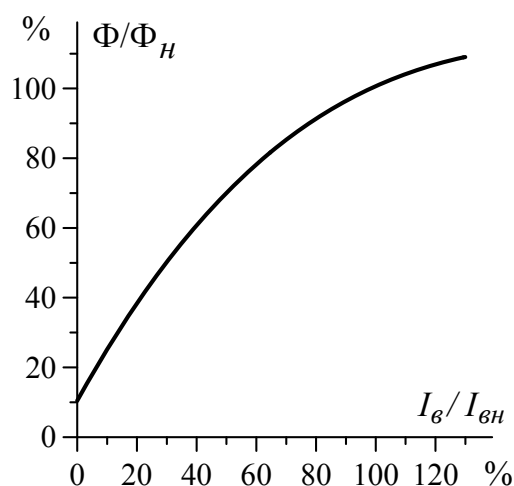


Рис. 12. Зависимость магнитного потока от тока возбуждения в машинах постоянного тока

Второй способ – использование регулировочного реостата в цепи якоря – позволяет изменять частоту вращения в широких пределах, но этот способ неэкономичен, так как регулировочный реостат включается в силовую цепь и на нем выделяется тепло, пропорциональное квадрату тока нагрузки. Частота холостого хода при изменении сопротивления в цепи якоря не меняется, как и маг-

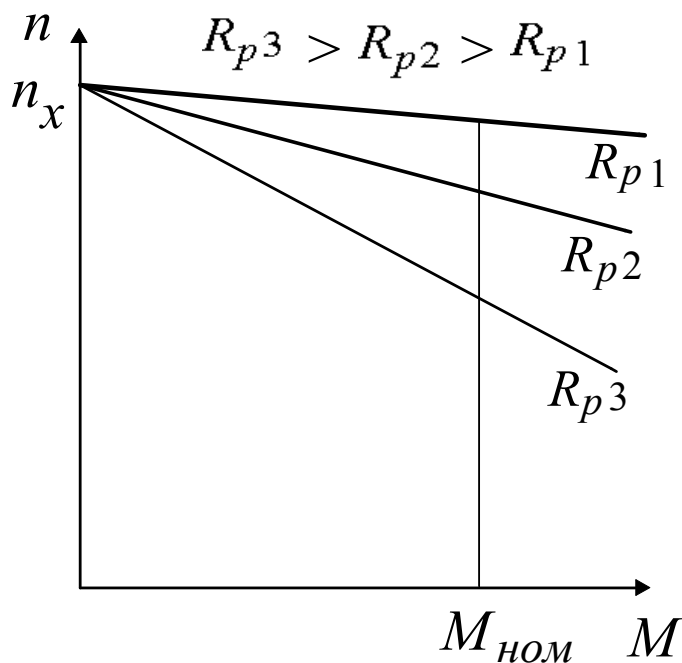


Рис. 13. Механические характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения при реостатном регулировании.

нитный поток. Выражение для определения частоты вращения (уравнение механической характеристики) выглядит следующим образом

$$n' = n_x - \frac{(R_{\text{я}} + R_p)}{C_e C_m \Phi^2} \cdot M, \text{ или } n' = n_{\text{ном}} \cdot \frac{U_{\text{ном}} - (R_{\text{я}} + R_p) I_{\text{я}}}{U_{\text{ном}} - R_{\text{я}} I_{\text{я, ном}}}.$$

Семейство механических характеристик при различных значениях сопротивления регулировочного реостата приведено на рис. 13.

Третий способ регулирования частоты вращения – якорное – применяется в основном для двигателей с независимым возбуждением. С одной стороны, необходимо обеспечить наличие регулируемого источника напряжения. С другой – к двигателям с параллельным возбуждением он неприменим, так как одновременно с током якоря будет изменяться и ток возбуждения, а следовательно, и магнитный поток. Каким образом изменится частота вращения в этом случае, заранее предсказать трудно.

Для определения энергетических характеристик двигателей необходимо определить потребляемую, отдаваемую мощности, а также суммарные потери. Мощность, подводимая к двигателю, – электрическая, определяемая подводимым к двигателю напряжением U и током внешней цепи I

$$P_1 = U \cdot I.$$

$$\text{Электромагнитная мощность } P_{\text{эм}} = E \cdot I_{\text{я}}.$$

Механическая мощность, вырабатываемая двигателем, обозначается P_2 (при обозначении номинальной мощности индекс “2” опускают). Вращающий момент двигателя на валу определяется как

$$M = 9,55 \cdot \frac{P_2}{n},$$

где коэффициент 9,55 означает, что мощность вычисляется в ваттах, а коэффициент 9550 используется в уравнении, если мощность измеряется в киловаттах.

Разницу между электрической и механической мощностями определяют как суммарные потери мощности – ΔP . Для двигателей коэффициент полезного действия определяют как

$$\eta = (P_1 - \Delta P) / P_1.$$

Исходя из устройства и принципа работы, суммарные потери можно разделить на следующие группы: электрические ($\Delta P_{эл}$), магнитные ($\Delta P_{магн}$), механические ($\Delta P_{мех}$) и добавочные ($\Delta P_{доб}$).

Электрические потери зависят от режима работы двигателя и определяются параметрами обмоток якоря и возбуждения

$$\Delta P_{эл} = R_{я} I_{я}^2 + R_{в} I_{в}^2.$$

Эти потери идут на нагрев обмоток.

Механические потери – это потери на трение на валу машины и трение о вращающегося якоря о воздух. Магнитные потери – это потери в сердечнике якоря на вихревые токи и гистерезис. В насыщенном сердечнике эти потери не зависят от режима работы. Добавочные потери связаны с наличием в машинах постоянного тока щеточно-коллекторного аппарата и определяются равными 1%

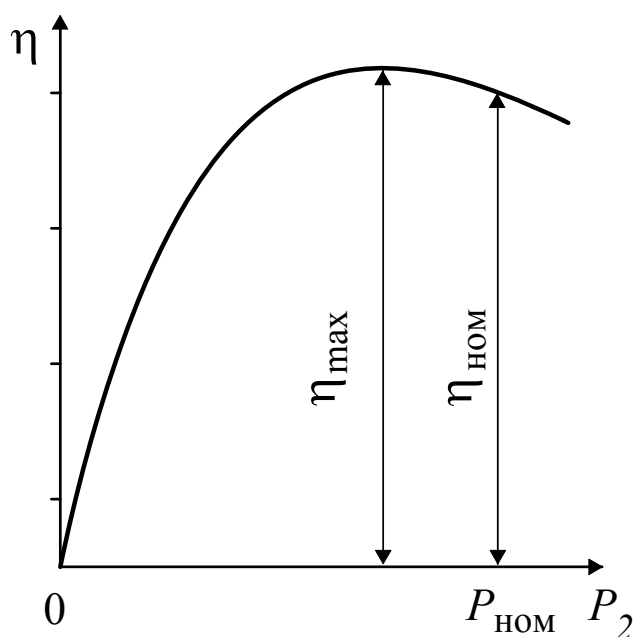


Рис. 14. Зависимость КПД двигателя постоянного тока от нагрузки

от номинальной мощности ($\Delta P_{\text{доб}} \approx 0,01 P_{\text{ном}}$).

Таким образом, коэффициент полезного действия зависит от нагрузки следующим образом (рис. 14).

Пример № 2.

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения характеризуется следующими номинальными величинами: напряжением на зажимах двигателя $U_{\text{ном}}$; мощностью $P_{\text{ном}}$; частотой вращения $n_{\text{ном}}$; коэффициентом полезного действия $\eta_{\text{ном}}$; током обмотки возбуждения $I_{\text{в,ном}}$; сопротивлением цепи якоря $R_{\text{я}}$. Необходимо:

- 1) определить номинальный вращающий момент;
- 2) определить пределы изменения частоты вращения двигателя при изменении величины добавочного сопротивления в цепи якоря $R_{\text{я}}$ от 0 до $4R_{\text{я}}$, при статическом моменте сопротивления $M_{\text{с}} = 1,2 M_{\text{ном}}$. Построить графики естественной и искусственной (при $R_{\text{д}} = 4R_{\text{я}}$) механических характеристик.

Дано:

$$\begin{aligned} U_{\text{ном}} &= 220 \text{ В}; \\ P_{\text{ном}} &= 12 \text{ кВт}; \\ n_{\text{ном}} &= 686 \text{ об/мин}; \\ \eta_{\text{ном}} &= 85,2 \%; \\ I_{\text{в,ном}} &= 1,75 \text{ А}; \\ R_{\text{я}} &= 0,281 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Решение:

1. Номинальный вращающий момент определим по уравнению:

$$M_{\text{ном}} = 9550 \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = 9550 \frac{12}{686} = 167 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2. Определим номинальный ток электродвигателя:

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}} \eta_{\text{ном}}} = \frac{12000}{220 \cdot 0,85} = 64 \text{ А}.$$

Определим номинальный ток якоря:

$$I_{я,ном} = I_{ном} - I_{в,ном} = 64 - 1,75 = 62,3 \text{ A.}$$

Определим произведения:

$$C_E \Phi = \frac{U_{ном} - I_{я,ном} R_{я}}{n_{ном}} = \frac{220 - 62,3 \cdot 0,281}{686} = 0,3;$$

$$C_M \Phi = \frac{M_{ном}}{I_{я,ном}} = \frac{167}{62,3} = 2,68.$$

Минимальную частоту вращения определим по уравнению:

$$n_{\min} = \frac{U_{ном}}{C_E \Phi} - \frac{R_{я} + 4R_{я}}{C_E C_M \Phi^2} \cdot (1,2 \cdot M_{ном}) = \frac{220}{0,3} - \frac{5 \cdot 0,281}{0,3 \cdot 2,68} \cdot 1,2 \cdot 167 = 390 \text{ об/мин.}$$

Определим максимальную частоту вращения:

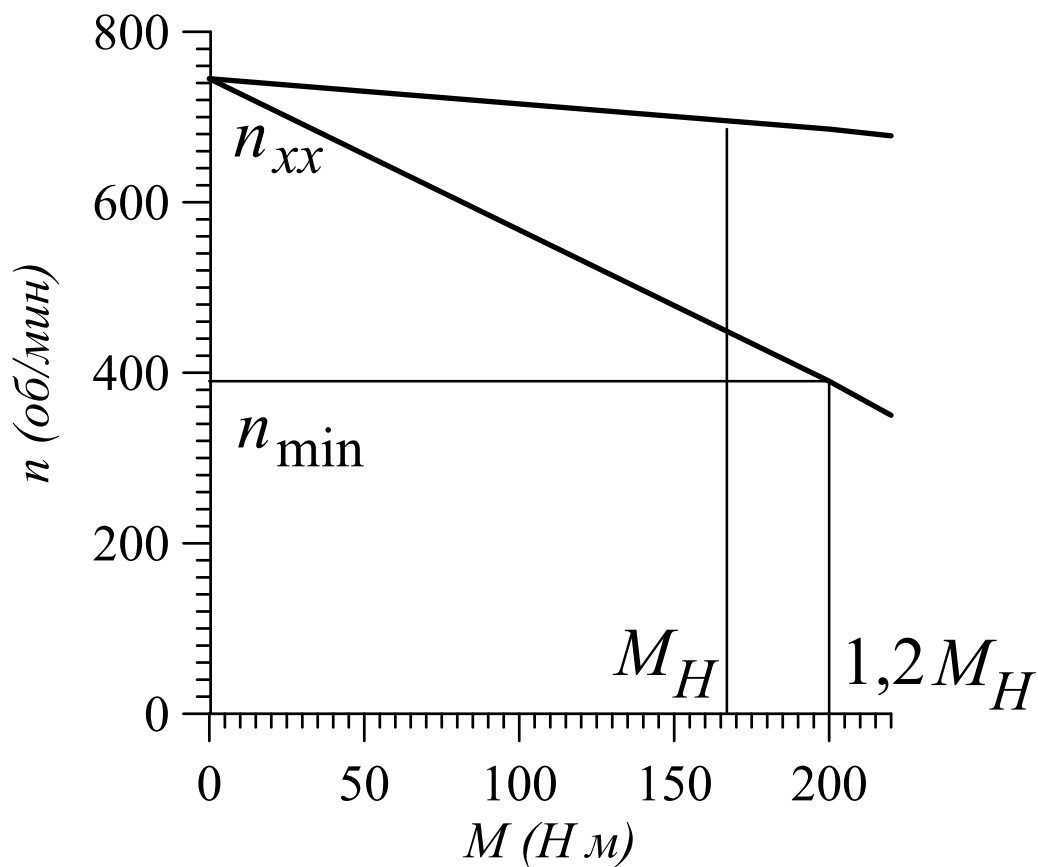


Рис.15. Механические характеристики двигателя:
естественная и искусственная .

$$n_{\max} = \frac{U_{\text{ном}}}{C_E \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{C_E C_M \Phi^2} \cdot (1,2 \cdot M_{\text{ном}}) = \frac{220}{0,3} - \frac{0,281}{0,3 \cdot 2,68} \cdot 1,2 \cdot 167 = 674 \text{ об/мин.}$$

Таким образом, частота вращения изменяется от 674 об/мин до 390 об/мин.

Механические характеристики имеют вид прямых линий. Поэтому для построения характеристик определим координаты двух точек. Для естественной характеристики при $M = 0$

$$n_{\text{хх}} = \frac{U_{\text{ном}}}{C_E \Phi} = \frac{220}{0,3} = 745 \text{ об/мин.}$$

При $M = 1,2$ $M_{\text{ном}} = 200 \text{ Н м}$, $n = n_{\min} = 390 \text{ об/мин}$.

Пример № 3.

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения характеризуется следующими номинальными величинами: напряжение на зажимах двигателя $U_{\text{ном}} = 110 \text{ В}$; мощность $P_{\text{ном}} = 8 \text{ кВт}$; частота вращения $n_{\text{ном}} = 1000 \text{ об/мин}$; ток якоря $I_{\text{ян}} = 83,5 \text{ А}$; сопротивление цепи якоря $R_{\text{я}} = 0,0644 \text{ Ом}$; сопротивление обмотки возбуждения $R_{\text{в}} = 42,4 \text{ Ом}$. Определить:

- 1) номинальный вращающий момент;
- 2) КПД $\eta_{\text{ном}}$ двигателя при номинальной нагрузке;
- 3) частоту вращения двигателя при статическом моменте сопротивления нагрузки $M_{\text{с}} = 0,8 M_{\text{ном}}$ и токе возбуждения $I_{\text{в}} = 0,8 I_{\text{в}}$.

При решении воспользоваться зависимостью $\Phi(I_{\text{в}})$. Построить графики естественной и искусственной механической характеристик.

Решение

$$1) M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = 9,55 \cdot \frac{8000}{1000} = 76,4 \text{ Н м}$$

$$2) \eta = \frac{P_{\text{ном}}}{P_1},$$

$$P_1 = I_{ном} U_{ном}, \quad I_{ном} = I_{я} + I_{в}, \quad I_{в ном} = \frac{U_{ном}}{R_{в}} = \frac{110}{42,4} = 2,6 \text{ А},$$

$$I_{ном} = I_{я ном} + I_{в ном} = 83,5 + 2,6 = 86,1 \text{ А},$$

$$P_1 = I_{ном} U_{ном} = 86,1 \cdot 110 = 9,471 \text{ кВт},$$

$$\eta = \frac{P_{ном}}{P_1} = \frac{8000}{9471} = 0,85.$$

3) Частота вращения идеального холостого хода двигателя

$$n_x = n_{ном} \frac{U_{ном}}{U_{ном} - I_{я ном} R_{я}} = 1000 \frac{110}{110 - 83,5 \cdot 0,0644} = 1051,4 \text{ об/мин}$$

$$I_{в} = 0,8 I_{в ном} = 0,8 \cdot 2,6 = 2,08 \text{ А}$$

$$\frac{I_{в}}{I_{в ном}} = \frac{2,08}{2,6} = 0,8 \cdot 100\% = 80\%$$

$$M_c = 0,8 M_{ном} = 0,8 \cdot 76,4 = 61,12 \text{ Нм}$$

$$\frac{n_0}{n_{ном0}} = \frac{\frac{U_{ном}}{C_E \Phi}}{\frac{U_{ном}}{C_E \Phi_{ном}}} = \frac{\Phi_{ном}}{\Phi} = 0,9$$

$$n = n_{ном} \frac{U_{ном} - R_{я} I_{я}}{U_{ном} - R_{я} I_{я ном}} \frac{\Phi_{ном}}{\Phi} = 1000 \cdot \frac{110 - 0,0644 \cdot 83,5 \cdot 0,8}{110 - 0,0644 \cdot 83,5} \cdot 0,9 = 1122,8 \text{ об/мин.}$$

$$\begin{aligned} \frac{n}{n_{ном}} &= \frac{U_{ном} - R_{я} I_{я}}{U_{ном} - R_{я} I_{я ном}} \frac{\Phi_{ном}}{\Phi} \Rightarrow n = n_{ном} \frac{U_{ном} - I_{я} R_{я}}{U_{ном} - I_{я ном} R_{я}} \cdot \frac{\Phi_{ном}}{\Phi} = \\ &= \frac{1122,8 \cdot 110 - 83,5 \cdot 0,0644}{110 - 83,5 \cdot 0,8 \cdot 0,0644} \cdot 0,9 = 1168,43 \text{ об/мин.} \end{aligned}$$

3. Расчет трехфазных асинхронных двигателей

3.1. Назначение и области применения асинхронных двигателей

Асинхронные машины используются в основном как двигатели. Они являются наиболее распространенными электрическими машинами – машинами переменного тока. В целом они потребляют около 50% электрической энергии, вырабатываемой электростанциями страны, и обеспечивают основные потребности при комплектовании электроприводов для всех отраслей промышленности. Такое широкое распространение асинхронные двигатели получили благодаря конструктивной простоте, низкой стоимости и высокой эксплуатационной надежности при минимальном обслуживании. Диапазон мощностей, на которые выпускаются эти двигатели, – от долей ватта до десятков тысяч киловатт. Они имеют относительно высокий коэффициент полезного действия: при мощностях более 1 кВт он составляет 0,7–0,95 и только в микродвигателях снижается до 0,2–0,65.

Принцип работы асинхронного двигателя заключается во взаимодействии вращающегося (или бегущего) магнитного поля и короткозамкнутого витка с током. При этом частота вращения подвижной части (ротора) не равна частоте вращения поля. Именно поэтому данный тип электродвигателя называется асинхронным, то есть несинхронным.

Магнитная система асинхронной машины состоит из двух сердечников: наружного неподвижного, имеющего форму полого цилиндра (статора), и внутреннего цилиндрического вращающегося сердечника (ротора). Оба они набираются из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Эти листы для уменьшения потерь на вихревые токи изолированы друг от друга слоем лака. В

пазах с внутренней стороны статора уложена трехфазная обмотка, токи которой возбуждают вращающееся магнитное поле машины. В пазах ротора размещена вторая обмотка, токи которой индуцируются вращающимся магнитным полем. Сердечник статора заключен в массивный корпус, являющийся внешней частью машины, а сердечник ротора закреплен на валу. В зависимости от конструкции обмотки асинхронные двигатели принято разделять на двигатели с короткозамкнутым ротором и двигатели с фазным ротором (или с контактными кольцами).

У двигателей первого типа обмотка ротора представляет собой цилиндрическую клетку – так называемое “белочье колесо” – из медных шин или алюминиевых стержней, замкнутых накоротко на торцах двумя кольцами. Стержни этой обмотки вставляются без изоляции в пазы ротора. Применяется также способ заливки пазов ротора расплавленным алюминием с одновременной отливкой и замыкающих колец.

У двигателей второго типа ротор имеет обмотку, выполненную изолированными проводниками, в большинстве случаев трехфазную, соединенную звездой. Свободные концы этой обмотки подводятся к контактными кольцам на валу ротора. По кольцам скользят щетки, через которые обмотка ротора соединяется с трехфазным реостатом. Такое устройство дает возможность изменять активное сопротивление цепи ротора, что особенно важно при пуске двигателя.

К недостаткам асинхронных двигателей при эксплуатации относится потребление из сети реактивного тока, необходимого для создания магнитного потока, в результате чего асинхронные двигатели работают с коэффициентом мощности меньше единицы ($\cos \varphi < 1$).

Асинхронные двигатели выпускаются для работы в однофазных, двухфазных и трехфазных сетях. Главным образом они выпускаются для работы от трехфазных сетей. Единая серия асинхронных двигателей 4А включает в себя двигатели мощностью от 0,06 до 400 кВт. Двигатели мощностью от 0,06 до 0,37 кВт выполняются на напряжение 220/380 В (первая цифра соответствует

соединению трехфазной обмотки статора по схеме “треугольник”, а вторая – по схеме “звезда”), мощностью от 0,55 до 110 кВт – на напряжение 220/380 и 380/660 В, мощностью от 132 до 400 кВт на напряжение 380/660. Помимо основного исполнения серии 4А, имеется целый ряд специализированных исполнений: тропическое, химическое, на частоту 60 Гц, сельскохозяйственное, текстильное и т. д. В зависимости от специфических требований привода выпускаются двигатели с повышенным пусковым моментом, повышенной перегрузочной способностью, многоскоростные, малошумные и т.д.

Обозначение типов двигателей расшифровывается следующим образом:

4 – порядковый номер серии; А – асинхронный; Н – исполнение по способу защиты от окружающей среды (Н – защищенное, отсутствие буквы – закрытое обдуваемое); следующая буква – обозначение исполнения ротора (К – ротор фазный, отсутствие буквы – ротор короткозамкнутый); затем – исполнение двигателя по материалу станины и щитов (А – станина и щиты алюминиевые, отсутствие буквы – станина и щиты чугунные). Далее указывается высота центров, за ней установочный размер, число полюсов, климатическое исполнение и категория размещения. Например, 4АА63А6У3 – асинхронный двигатель серии 4А, закрытое обдуваемое исполнение со станиной и щитами из алюминия, с высотой оси вращения 63, магнитопровод первой длины шестиполюсный, для районов умеренного климата, третьей категории размещения. Всего в серии 4А свыше сотни типоразмеров двигателей.

Асинхронные двигатели серии АИ принадлежат к новой унифицированной серии, у которой по сравнению с серией 4А выше КПД, надежность, снижена материалоемкость, уменьшены шумы и вибрации. Для работы в крановых и металлургических электроприводах выпускаются двигатели серий МТФ, МТКФ, МТН и МТКН. У двигателей МТФ и МТКФ фазный ротор, а у двух других короткозамкнутый. Двигатели имеют кратность максимального момента, равную 2,3 – 3,2. Мощности двигателей от 1,4 до 37 кВт, напряжение сети 220/380. Для

привода бытовых приборов (звукозаписывающая аппаратура, перемотка ленты, контрольно-кассовые аппараты, центрифуга, фреоновый компрессор) применяются асинхронные конденсаторные двигатели серии КД и т. д.

3.2. Паспортные данные трехфазных асинхронных двигателей

К паспортным данным трехфазных асинхронных двигателей относятся следующие:

1. Номинальная мощность $P_{ном}$, выраженная в киловаттах (кВт). Это механическая мощность на валу машины.

2. Номинальное напряжение $U_{ном}$. Это линейное напряжение обмотки статора. Обычно в виде дроби указываются два напряжения, отличающиеся друг от друга в $\sqrt{3}$ раз. При большем напряжении сети трехфазная обмотка статора соединяется в звезду, а при меньшем – в треугольник.

3. Линейные токи $I_{ном}$. Они указываются в виде дроби соответственно при соединении обмоток в звезду и в треугольник.

4. Частота питающей сети f , выраженная в герцах. Промышленная частота на территории СНГ составляет 50 Гц.

5. Частота вращения ротора $n_{ном}$, выраженная в оборотах в минуту(об/мин). Эта частота у асинхронных двигателей не совпадает с частотой вращения поля, создаваемого обмоткой статора n_1 . Частота вращения поля называется синхронной частотой и в зависимости от числа пар полюсов двигателя определяется округлением номинальной частоты вращения до ближайшей синхронной (таб. 1).

6. Номинальное скольжение $s_{ном}$. Скольжение характеризует рабочие условия двигателя и определяется как $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ в относительных единицах или

процентах. При номинальной нагрузке скольжение обычно находится в пределах 0,015–0,05 (или 1,5–5%).

Таблица 1.

p	1	2	3	4	5	6	8	10
n_1 (об/мин)	3000	1500	1000	750	600	500	375	300

7. Коэффициент мощности $\cos \varphi_{ном}$, определяемый отношением активной мощности двигателя к полной, потребляемой из сети в номинальном режиме

$$\cos \varphi_{ном} = \frac{P_{1ном}}{S_{1ном}}.$$

При полной нагрузке асинхронные двигатели имеют коэффициент мощности от 0,7 до 0,9, следовательно, реактивный ток составляет от 100 до 50% активного тока двигателя, или от 70 до 40% номинального тока. Таким образом, асинхронные двигатели загружают электрическую сеть и станцию значительными реактивными токами. Эти реактивные токи являются намагничивающими, поддерживающими переменное магнитное поле двигателя. Магнитный поток двигателя пропорционален фазному напряжению, а намагничивающий ток пропорционален магнитному потоку и обратно пропорционален магнитному сопротивлению. Магнитное сопротивление в основном определяется наличием воздушного промежутка между статором и ротором. Естественно, что при конструировании двигателя этот промежуток стремятся сделать минимальным.

Другим способом повышения коэффициента мощности является полная загрузка двигателя, так называемое “естественное улучшение $\cos \varphi$ ”. Поскольку активный ток двигателя пропорционален его механической нагрузке, то с уменьшением нагрузки доля реактивного тока возрастает, а коэффициент мощности уменьшается. Увеличение $\cos \varphi$ в промышленной установке с асинхронным двигателем производится также с помощью компенсации индуктивного от-

стающего тока опережающим емкостным. Для этого параллельно работающему двигателю в каждую фазу включают конденсаторную батарею.

8. Коэффициент полезного действия $\eta_{ном}$ в относительных единицах или процентах. Определяется как отношение номинальной мощности к мощности, потребляемой двигателем из сети $\eta_{ном} = \frac{P_{ном}}{P_{1ном}} \cdot 100\%$.

9. Кратность максимального момента k_m , определяемая как отношение максимального момента, развиваемого двигателем, к номинальному моменту двигателя $k_m = \frac{M_{max}}{M_{ном}}$. У серийных двигателей кратность максимального момента лежит в пределах 1,7–3,4.

10. Кратность пускового момента k_n , определяемая как отношение пускового момента к номинальному $k_n = \frac{M_n}{M_{ном}}$. У серийных двигателей кратность пускового момента лежит в пределах 0,8–1,8.

3.3. Характеристики трехфазных асинхронных двигателей

Зависимость вращающего момента асинхронного двигателя от режима работы определяется значением скольжения s , параметрами сети и самого двигателя. Это соотношение можно получить, анализируя схему замещения асинхронного двигателя, подобную схеме замещения трансформатора. В самом деле, отличия физических процессов в двигателе и трансформаторе в основном сосредоточены в той части, которая касается наличия воздушного зазора между статором и ротором. Учитывая эти факты, зависимость момента от скольжения определяется соотношением

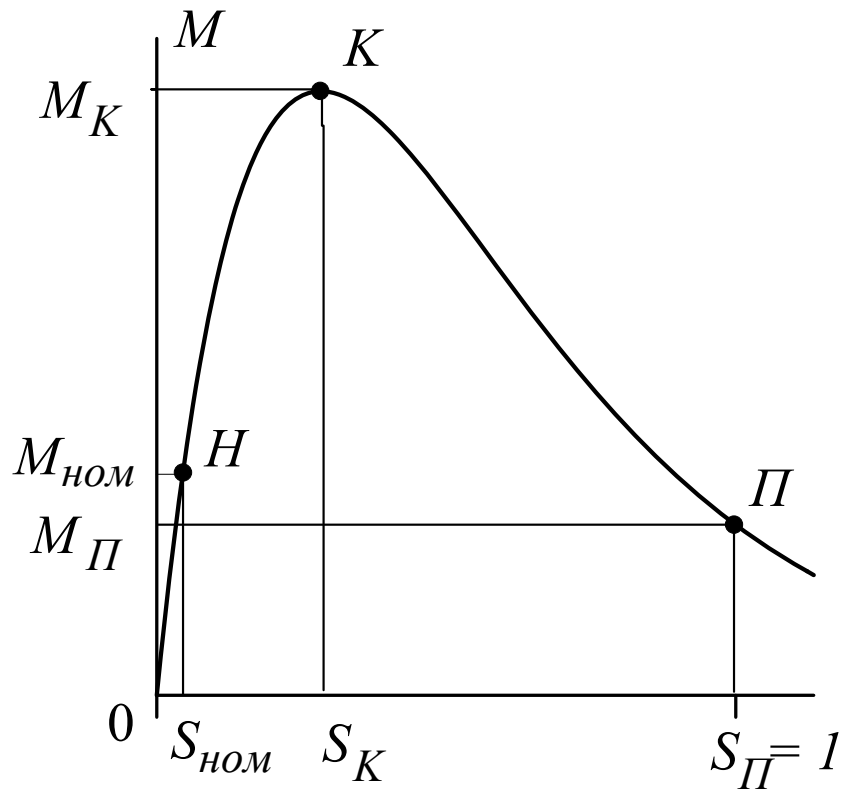


Рис. 16. Пусковая характеристика асинхронного двигателя

$$M = \frac{mpU_1^2 R_2'}{\omega_1 s \left[\left(R_2' / s \right)^2 + (X_k)^2 \right]},$$

где m – число фаз двигателя, p – число пар полюсов, U_1 – питающее напряжение, ω_1 – циклическая частота напряжения сети ($\omega_1 = 2\pi \cdot f_1$), s – скольжение, R_2' – приведенное сопротивление обмотки ротора, $X_k = X_1 + X_2'$, X_1 – реактивное сопротивление обмотки статора, X_2' – приведенное реактивное сопротивление обмотки ротора. Графически эта зависимость представлена на рис. 16. Эта характеристика называется пусковой, так как позволяет наиболее наглядно проиллюстрировать процессы, происходящие при пуске двигателя.

Точка $s = 0$, $M = 0$ соответствует идеальному холостому ходу двигателя. Такой режим возможен лишь при вращении ротора другим приводным двигателем. Только в этом случае частоты вращения ротора и поля совпадают. У самостоятельно работающего двигателя эти частоты никогда не совпадают, а сколь-

жение составляет доли процента. Точка $M_{ном}, s_{ном}$ соответствует номинальному режиму. Участок ОН графика — это рабочий участок, где зависимость $M(s)$ практически линейная. Так как скольжение на этом участке не превосходит 5–8%, то $(R_2' / s)^2 \gg X_k^2$, а значит параметром X_k^2 можно пренебречь, и выражение для момента выглядит следующим образом

$$M = 3pU_1^2 ps / \omega_1 R_2',$$

где $3pU_1^2 / \omega_1 \cdot R_2'$ — величина для данного двигателя постоянная.

Участок НК характеристики соответствует механической перегрузке двигателя. В точке К вращающий момент достигает максимального значения и называется критическим (или максимальным) моментом. Скольжение s_k , соответствующее максимальному моменту, называется критическим скольжением. Участок ОК характеристики определяет устойчивый режим работы двигателя, где реализуется свойство двигателя автоматически компенсировать малые отклонения в режиме работы за счет собственных характеристик. Например, если в установившемся режиме ($M_{вр} = M$) по какой-либо причине момент сопротивления увеличится и станет равным $M' > M$, то последует переходный процесс: частота вращения ротора s уменьшится, скольжение s увеличится, а вращающий момент согласно характеристике $M(s)$ возрастет, и двигатель выйдет на новый установившийся режим, характеризующийся пониженной частотой вращения n' и равенством моментов $M'_{вр} = M'$. Статически устойчивый участок характеризуется положительной производной $dM / ds > 0$. Значение максимального момента определяется из условия $dM / ds = 0$. В результате можно получить значение критического скольжения

$$s_k = R_2' / X_k,$$

соответственно, значение максимального момента

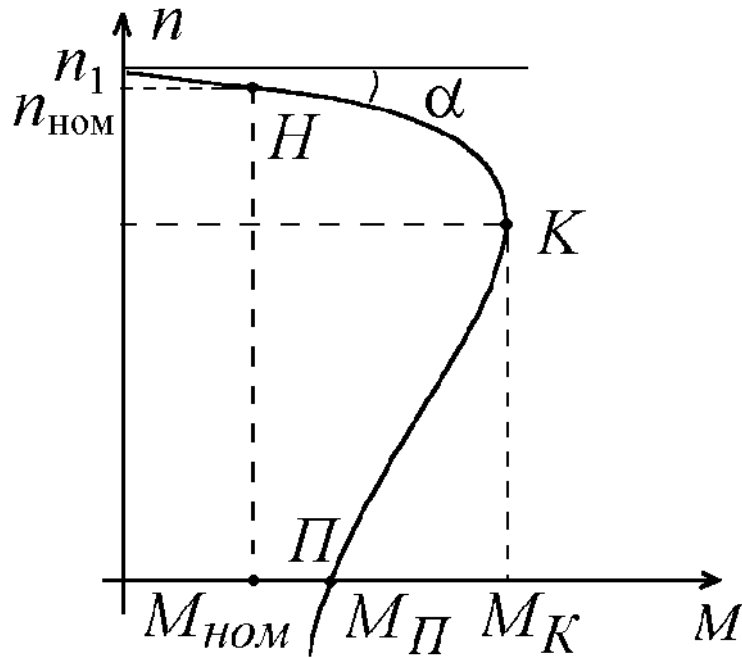


Рис. 17. Механическая характеристика асинхронного двигателя

$$M_m = 3pU_1^2 / 2\omega_1 X_k.$$

Участок КП – участок неустойчивой работы. Если по какой-либо причине M_c станет больше $M_{вр}$, то анализ, аналогичный анализу для устойчивого участка, показывает, что $M_{вр}$ уменьшится, что приведет к увеличению скольжения и еще большему уменьшению вращающего момента — практически ротор двигателя быстро остановится (точка П). Участок неустойчивой работы характеризуется отрицательной производной $dM / ds < 0$. В точке П скольжение равно единице ($n = 0$).

Для практических расчетов используется зависимость момента от скольжения, выраженная в относительных единицах, называемая формулой Клоса

$$M = \frac{2M_m}{s_k / s + s / s_k},$$

которая хорошо аппроксимирует пусковую характеристику на линейном участке, участке устойчивой работы ОК. На участке механической перегрузки от точки К до точки П погрешность возрастает и наибольшего расхождения достигает в точке пуска П. Поскольку, с точки зрения эксплуатации, наибольшее значение

имеет именно рабочий участок, то формула Клоса является очень эффективной для оценки свойств двигателя.

Важнейшей характеристикой асинхронного двигателя является его механическая характеристика, представляющая собой зависимость частоты вращения ротора от момента нагрузки на валу, то есть $n(M)$ (рис. 17). От ее характера зависит пригодность асинхронного двигателя для привода различных производственных механизмов. Например, для многих станков требуется, чтобы частота вращения двигателя оставалась неизменной или почти неизменной при изменении нагрузки. Наряду с этим механизмы, работающие при резко изменяющихся нагрузках — прессы, краны, ножницы, — требуют быстрого изменения частоты вращения. Поэтому механическая характеристика двигателя играет существенную роль при проектировании электропривода. Ее легко получить из формулы Клоса, если из паспортных или каталожных данных известны значения кратности пускового и максимального моментов и номинальная частота вращения ротора. Тогда критическое скольжение определяется из формулы Клоса следующим образом

$$s_k = k_M \cdot s_{ном} + \sqrt{(k_M \cdot s_{ном})^2 - s_{ном}^2}.$$

Для точки пускового режима пусковое скольжение полагается равным единице ($s_n = 1$), можно получить значение пускового момента

$$M_n = \frac{2M_K}{s_K / 1 + 1/s_K}.$$

Задавая значения скольжения от $s_{ном}$ до 1 и вычисляя значения частоты вращения $n = n_1 \cdot (1 - s)$, можно построить участок механической характеристики от участка НКП. Линейный (рабочий) участок характеристики строится по двум точкам ($n_x = n_1, M_x = 0$) и ($n = n_{ном}, M = M_{ном}$).

Другой необходимой информацией о работе двигателя являются его энергетические характеристики. Определенному режиму работы двигателя соответ-

ствуют свои значения токов в обмотках статора и ротора, а значит, и потери мощности в электрической, магнитной и механической цепях.

Потребляемая двигателем электрическая мощность P_1 преобразуется в механическую P_2 . Механическая мощность связана с вращающим моментом двигателя соотношением, определяемым, как и для двигателя постоянного тока

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

Электрическая мощность определяется напряжением сети и токами обмотки статора. Для трехфазного асинхронного двигателя независимо от способа соединения обмотки статора в номинальном режиме она определяется соотношением

$$P_{1ном} = \sqrt{3} \cdot U_{1ном} I_{1ном} \cos \varphi_{ном}.$$

Тогда механическая мощность в номинальном режиме (номинальная мощность) может быть представлена в виде

$$P_{ном} = \eta_{ном} \cdot P_{1ном}.$$

Коэффициент полезного действия в номинальном режиме определяется как отношение номинальной механической мощности к номинальной электрической мощности

$$\eta_{ном} = \frac{P_{ном}}{P_{1ном}} = \frac{P_{1ном} - \Delta P_{ном}}{P_{1ном}},$$

где $\Delta P_{ном}$ – суммарные потери мощности в номинальном режиме.

Мощность потерь, нагревающих двигатель, складывается из мощности электрических, магнитных и механических потерь. Электрические потери $\Delta P_{эл}$ возникают в обмотках статора и ротора, то есть $\Delta P_{эл} = \Delta P_{эл,с} + \Delta P_{эл,р}$. Магнитные потери возникают в сердечнике статора и ротора за счет явлений гистерезиса и вихревых токов, однако магнитными потерями в сердечнике ротора можно пренебречь, поскольку в номинальном режиме частота тока ротора составляет

1–4 Гц. При такой частоте тока, а значит и поля, потери из-за гистерезиса и вихревых токов в роторе весьма малы, поэтому практически можно считать, что $\Delta P_m = \Delta P_{m,c}$. Механические потери ΔP_{mex} вызваны силами трения в подшипниках и силами трения о воздушную среду, в скользящем контакте на кольцах. В результате вышеизложенного суммарные потери мощности можно представить в виде

$$\Delta P = \Delta P_{эл,c} + \Delta P_{эл,p} + \Delta P_{m,c} + \Delta P_{mex}.$$

Коэффициент полезного действия для асинхронного двигателя в зависимости от режима работы с учетом вышеприведенного соотношения для потерь можно вычислить по формуле аналогичного соотношения трансформатора

$$\eta(\beta) = \frac{\beta \cdot P_{ном}}{\beta \cdot P_{ном} + \Delta P_{m,c} + \beta^2 \cdot \Delta P_{эл,ном}},$$

где β – коэффициент загрузки асинхронного двигателя, определяемый как отношение мощности на валу к номинальной мощности $\beta = \frac{P_2}{P_{ном}}$. Зависимость

$\eta(\beta)$ аналогична подобной зависимости для трансформатора (рис. 6). Для серийных двигателей КПД составляет 0,75-0,95, причем с увеличением мощности двигателя КПД возрастает. Возрастает он также при увеличении частоты вращения

Пример № 4.

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором характеризуется следующими величинами: номинальный момент $M_{ном}$; частота вращения $n_{ном}$; ток $I_{ном}$ коэффициент мощности $\cos \varphi_{ном}$ при номинальной нагрузке; кратность максимального момента относительно номинального $M_{max} / M_{ном}$

Двигатель питается от сети с линейным напряжением U . Номинальное фазное напряжение обмотки статора $U_{1\phi} = 220$ В.

1. Определить способ соединения обмотки статора.

2. Определить число пар полюсов обмотки статора.
3. Определить частоту вращения двигателя при $M = 1.4 M_{ном}$
4. Определить коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке.

Дано:

$$U = 380 \text{ В};$$

$$M_{ном} = 731 \text{ Н м};$$

$$n_{ном} = 980 \text{ об/мин};$$

$$I_{ном} = 137 \text{ А};$$

$$\cos \varphi_{ном} = 0,9;$$

$$M_{max} / M_{ном} = 1,8.$$

Решение:

1. При линейном напряжении сети $U = 380 \text{ В}$ фазное напряжение сети равно $U_\phi = 220 \text{ В}$, поэтому обмотку статора необходимо соединить в звезду. Тогда к обмотке будет приложено фазное напряжение сети.

2. Определим число пар полюсов

$$p = \frac{60 f_1}{n_1},$$

где f_1 — частота обмотки статора, равная частоте тока сети, $f_1 = 50 \text{ Гц}$; n_1 — синхронная частота вращения (об/мин). В нашем случае синхронная частота вращения равна $n_1 = 1000 \text{ об/мин}$ и

$$p = \frac{60 \cdot 50}{1000} = 3.$$

3. Определим критическое скольжение из уравнения Клоса:

$$M_H = \frac{2M_M}{\frac{S_H}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S_H}}; \quad S_{кр} = S_H \cdot \left(M_M / M_H + \sqrt{(M_M / M_H)^2 - 1} \right),$$

где S_H и $S_{кр}$ — соответственно номинальное и критическое скольжения. Определим номинальное скольжение:

$$S_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{1000 - 980}{1000} = 0.02.$$

Определим критическое скольжение:

$$S_{кр} = 0.02 \left(1.8 + \sqrt{1.8^2 - 1} \right) = 0.066.$$

Используя формулу Клоса, определим величину скольжения при заданном моменте $M = 1.4 M_H$:

$$\begin{aligned} S &= \frac{S_{кр}}{M_M / M + \sqrt{(M_M / M)^2 - 1}} = \frac{S_{кр}}{\frac{M_M / M_H}{1.4} + \sqrt{\left(\frac{M_M / M_H}{1.4} \right)^2 - 1}} = \\ &= \frac{0.066}{\frac{1.8}{1.4} + \sqrt{\left(\frac{1.8}{1.4} \right)^2 - 1}} = 0.031. \end{aligned}$$

Определим частоту вращения при заданном моменте:

$$n = (1 - s) n_1 = (1 - 0.031) 1000 = 969 \text{ об/мин.}$$

4. Из известной формулы определения номинального тока:

$$I_{ном} = \frac{P_H}{\sqrt{3} U \eta_{ном} \cos(\varphi_{1ном})},$$

где $P_{ном}$ — номинальная мощность на валу двигателя (Вт). Выразим КПД

$$\eta_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} U I_H \cos(\varphi_{1H})}.$$

Неизвестную в этой формуле мощность определим из уравнения:

$$M_{ном} = 9550 \frac{P_{ном}}{n_{ном}},$$

в результате

$$P_H = \frac{M_{ном} n_{ном}}{9550} = \frac{731 \cdot 980}{9550} = 75 \text{ кВт.}$$

Теперь можно определить коэффициент полезного действия:

$$\eta_{ном} = \frac{75 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 137 \cdot 0.9} = 0.924.$$

4. Принципы выбора электродвигателей

При выборе электродвигателя для приведения в движение исполнительного механизма главным является его соответствие условиям технологического процесса рабочей машины. Задача выбора состоит в поиске такого двигателя, который обеспечивал бы заданный технологический цикл рабочей машины, соответствовал бы условиям окружающей среды и компоновки с рабочей машиной и при этом имел нормативный нагрев.

Если выбранный двигатель имеет недостаточную мощность, то это может привести к нарушению заданного цикла, снижению производительности рабочей машины. При этом возникает опасность для самого двигателя, так как повышенный нагрев его обмоток ведет к ускоренному старению изоляции и преждевременному выходу двигателя из строя.

При завышенной мощности двигателя уменьшается коэффициент полезного действия двигателя, необоснованно возрастают расходы на эксплуатацию, и возникает угроза выхода из строя исполнительного механизма.

Выбор электродвигателя производится обычно в такой последовательности:

- расчет мощности и предварительный выбор двигателя;
- проверка выбранного двигателя по условиям пуска;
- проверка выбранного двигателя по перегрузке;
- проверка выбранного двигателя по нагреву.

Если выбранный двигатель удовлетворяет этим условиям, то на этом выбор двигателя заканчивается. Если же двигатель не соответствует хотя бы одному из условий проверки, то выбирается другой двигатель (большей мощности) и проверка производится по тем же направлениям. Основой такого расчета являются нагрузочная диаграмма и диаграмма скорости (тахограмма) исполнительного механизма.

В зависимости от технологического процесса исполнительного механизма принято различать три основных режима работы: длительный, кратковременный и повторно-кратковременный (рис. 18).

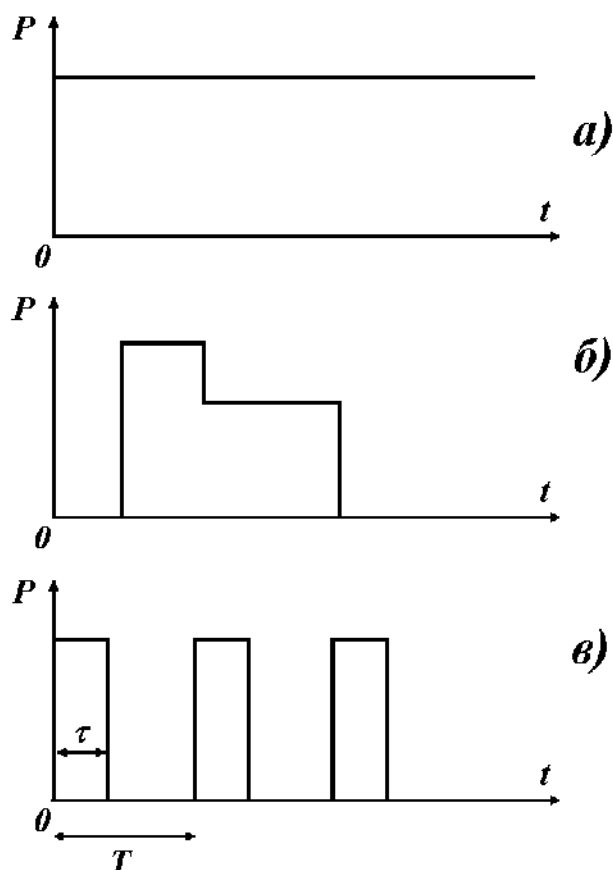


Рис. 18. Диаграммы мощностей различных типов привода:

- а) длительного режима; б) кратковременного режима;
- в) повторно-кратковременного режима

При длительном (подолжительном) режиме нагрузка двигателя изменяется мало, и температура электродвигателя привода достигает своего установившегося значения. В качестве примеров исполнительных механизмов с длительным режимом работы можно назвать вентиляторы, компрессоры, центробежные насосы, конвейеры, бумагоделательные машины и т. д.

При кратковременном режиме рабочий период относительно краток, а перерыв в работе исполнительного механизма достаточно велик для того, чтобы

температура двигателя упала практически до температуры окружающей среды. Такой режим работы характерен для таких механизмов кратковременного действия, как шлюзы, разводные мосты, подъемные шасси самолетов и т. д.

При повторно-кратковременном режиме периоды работы чередуются с периодами пауз (остановка или холостой ход), причем, ни в один из периодов работы температура двигателя не понижается до температуры окружающей среды. Характерной величиной для такого режима является отношение рабочей части периода τ ко всему периоду T . Эта величина именуется относительной продолжительностью работы (ПР%), или относительной продолжительностью включения (ПВ%). В таком режиме работают некоторые металлорежущие станки, прокатные станы, буровые станки в нефтяной промышленности и т. д.

Длительной мощностью электродвигателя является мощность, которую двигатель может отдавать на валу в течение произвольно долгого времени, не перегреваясь свыше допустимой температуры. Фактически температура нагрева изоляции является и наибольшей температурой нагрева. Номинальная мощность двигателя, указанная на щитке или в каталоге, определяется для условий стандартной температурой среды, равной 35°C . Если же температура окружающей среды выше 35°C , то длительная мощность будет ниже указанной на щитке. Кроме длительной мощности в качестве характеристики работы двигателя может выступать мгновенная перегрузочная мощность – это наибольшая мощность, которую двигатель может отдать на валу в течение короткого промежутка времени без каких-либо повреждений. Перегрузочная мощность определяется механическими или электрическими свойствами двигателя и характеризуется коэффициентом перегрузки по моменту (например кратностью максимального момента у асинхронного двигателя). В ряде случаев для привода важна перегружаемость не мгновенная, а на определенный, относительно короткий промежуток времени – кратковременная перегрузочная мощность. Это мощность, которую двигатель может отдавать в течение определенного ограниченного проме-

жутка времени, после чего двигатель должен быть выключен до тех пор, пока не успеет охладиться до температуры окружающей среды.

Выбор мощности двигателя для продолжительного (длительного) режима с постоянной нагрузкой осуществляется в соответствии с мощностью исполнительного механизма. Например, для вентилятора необходимая мощность определяется соотношением

$$P = \frac{V \cdot h}{\eta_e \cdot \eta_n},$$

где V – производительность вентилятора, то есть количество нагнетаемого воздуха, h – напор вентилятора, η_e и η_n – коэффициенты полезного действия вентилятора и передачи от двигателя к вентилятору соответственно. Для металлорежущего станка, работающего с постоянной мощностью, она определяется по формуле

$$P = k \cdot F \cdot v,$$

где k – постоянный коэффициент, учитывающий КПД станка и передачи от двигателя к станку, F – сила резания, v – линейная скорость. Определив по приведенным формулам мощность P , необходимо выбрать мощность двигателя по каталогу так, чтобы расчетная мощность $P \leq P_{\partial}$. При этом двигатель должен обладать ближайшей мощностью двигателей выбираемой серии.

Режим работы электропривода наряду с диаграммой мощностей (рис. 18) может быть представлен в виде диаграммы моментов $M(t)$ или диаграммы токов $I(t)$, так как эти параметры также характеризуют необходимые условия для выбора двигателя. Для продолжительного режима с переменной нагрузкой мощность двигателя рассчитывается по средним потерям или среднеквадратичным значениям момента, тока или мощности.

Метод средних потерь заключается в том, что вначале находится средняя мощность по формуле

$$P_{cp} = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + \dots + P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}.$$

Затем по каталогу выбирается двигатель, имеющий мощность $P_{ном}$, так, чтобы она была на 10-30% больше средней расчетной мощности P_{cp} . По данным каталога для выбранного двигателя строится зависимость КПД от нагрузки $\eta(\beta)$. По графику определяются мощности потерь

$$\Delta P = P_{ном} \cdot \frac{1 - \eta}{\eta}.$$

По кривой потерь для заданных мощностей определяются потери при каждой развиваемой мощности $\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_{ном}$, и строится график $\Delta P(P)$. Затем находятся средние потери ΔP_{cp} . Эти потери сравниваются с потерями мощности в номинальном режиме. Если средние потери приблизительно равны номинальным, то двигатель выбран верно, если окажется, что средние потери значительно больше или значительно меньше, то подбирается двигатель соответственно с меньшей или большей мощностью и расчет производится повторно.

Менее точные, но более удобные методы выбора двигателя называются методами эквивалентной мощности, эквивалентного момента, эквивалентного тока (или методами среднеквадратичных значений). Нагрузочные диаграммы должны быть заданы зависимостями $P(t)$, $M(t)$, $I(t)$. По ним определяются значения эквивалентной мощности, эквивалентного момента и эквивалентного тока

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}},$$

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}},$$

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}.$$

Проверка двигателя по мощности осуществляется сравнением эквивалентной мощности и номинальной. Если $P_{\text{ном}} \geq P_{\text{э}}$, то проверка продолжается сравнением максимального и пускового моментов, развиваемых двигателем, с соответствующими значениями заданной нагрузочной диаграммы при условии $n = \text{const}$ из соотношения $M = 9,55 \cdot \frac{P}{n}$. А поскольку при неизменном магнитном потоке у двигателя постоянного тока и асинхронного двигателя (при неизменном питающем напряжении в режимах, близких к номинальному, сердечники якоря и ротора насыщены) момент пропорционален току, можно перейти к проверке двигателя по току. При этом должно выполняться условие $I_{\text{э}} \leq I_{\text{ном}}$. Далее проверяется перегрузочная способность двигателя по току, то есть должно соблюдаться условие $I_{\text{max}} / I_{\text{ном}} \leq k_I$ (k_I – кратность пускового тока по паспорту, или допустимая перегрузка по току; I_{max} – максимальный ток по нагрузочному графику).

При повторно-кратковременном режиме выбор электродвигателя имеет особенности. Определение мощности двигателя начинается с расчета продолжительности включения

$$ПВ\% = \frac{t_p}{T} \cdot 100,$$

где t_p – время работы, T – продолжительность цикла. Каждому стандартному значению $ПВ\%$ соответствует значение номинальной мощности, с которой в данном режиме двигатель может работать не перегреваясь. Чем выше продолжительность включения, тем меньше должна быть нагрузка двигателя. Стандартные значения продолжительности включения составляют 15%, 25%, 40%, 60%. Пересчет эквивалентных величин на стандартное значение продолжительности включения производится по формулам

$$P_{cm,\varepsilon} = P_{\varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{PB\%}{PB_{cm}\%}},$$

$$M_{cm,\varepsilon} = M_{\varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{PB\%}{PB_{cm,\varepsilon}\%}},$$

$$I_{cm,\varepsilon} = I_{\varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{PB\%}{PB_{cm,\varepsilon}\%}}.$$

После определения стандартной эквивалентной величины по каталогу определяется двигатель, причем при известной диаграмме моментов и вычисленном значении $M_{cm,\varepsilon}$ значение $P_{cm,\varepsilon} = \frac{M_{cm,\varepsilon} \cdot n_1}{9550}$ [кВт]. Затем производится проверка двигателя с мощностью $P_{ном} \geq P_{cm,\varepsilon}$ на допустимую перегрузку. Определяется номинальный момент двигателя

$$M_{ном} = 9550 \cdot \frac{P_{ном}}{n_{ном}}.$$

Наибольшая мощность, потребляемая двигателем, вычисляется по формуле

$$P_{наиб} = \sqrt{3} \cdot I_{max} \cdot U_{ном} \cdot \cos \varphi_{ном},$$

где максимальный ток определяется из нагрузочной диаграммы. Полезная мощность на валу $P_{2,max} = P_{наиб} \cdot \eta_{ном}$.

Тогда наибольший момент сопротивления на валу

$$M_{наиб.сопр.} = 9550 \cdot \frac{P_{2,max}}{n_{2,кр}}.$$

Максимально допустимый момент двигателя должен удовлетворять следующим условиям

$$M_{max,дон} = 0,9 M_{max}.$$

При этом коэффициент 0,9 учитывает возможное понижение питающего напряжения на 5%, или учитывая паспортное значение кратности максимального момента k_m

$$M_{max, доп} = 0,9 \cdot k_m \cdot M_{ном}.$$

Для нормальной работы двигателя необходимо выполнение следующего условия

$$M_{max, доп} \geq M_{наиб, сопр}.$$

Если это условие не выполняется, необходимо выбрать двигатель с большей мощностью и провести проверку снова.

Если задана нагрузочная диаграмма момента $M(t)$, то $M_{наиб, сопр}$ выбирается из диаграммы. Если задана нагрузочная диаграмма мощности $P(t)$, то $P_{2, max}$ определяется из диаграммы.

Проверка пусковых свойств определяется из условия $M_n = k_n \cdot M_{ном} \geq M_1$, где M_1 – момент на первом рабочем участке нагрузочной диаграммы момента. Он определяется как момент сопротивления на валу двигателя при пуске.

Если для расчета представлена диаграмма тока или мощности, то расчеты производятся в предположении

$$\frac{M_{наиб, сопр}}{M_{пуск, сопр}} = \frac{I_{max}}{I_{пуск}} = \frac{P_{2, max}}{P_1}.$$

Помимо мощности двигателя необходимо выбрать род тока и конструктивную форму выполнения. В силу низкой эксплуатационной стоимости и простоты обслуживания, а также поскольку подавляющее большинство промышленных предприятий получают энергию от сетей трехфазного тока частотой 50 Гц наиболее распространены асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Двигатели с фазным ротором дороже, его габариты больше, его обслуживание сложнее. Поэтому они устанавливаются лишь при наличии особых тре-

бований к пусковому моменту или пусковому току (требование, связанное с ограниченной мощностью трансформаторной подстанции). Поэтому основным видом двигателей для мощности до 100 кВт при нерегулируемом приводе являются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором.

Если требуется регулирование частоты вращения двигателя, то преимущества имеют двигатели постоянного тока, у которых имеется возможность плавного и экономичного регулирования в пределах 1:3 и даже 1:4. Недостатком такого приводного устройства является необходимость значительных затрат на установку преобразователей переменного тока в постоянный, использующихся в качестве источников питания. Однако в ряде случаев плавное регулирование частоты вращения является обязательным условием для работы исполнительного механизма, поэтому дополнительные затраты покрываются прибылью от регулирования скорости.

Выбор конструкции двигателя осуществляется в зависимости от условий окружающей среды. В большинстве случаев устанавливаются двигатели защищенного типа, в которых вентиляционные отверстия закрыты решетками, защищающими двигатель от попадания внутрь влаги, посторонних частиц, но не от пыли. В запыленных помещениях при наличии в воздухе паров, едких испарений и т. п. устанавливаются двигатели закрытого типа. При этом требуется наличие специального воздуховода для продувания охлаждающим воздухом. В сырых помещениях применяются защищенные двигатели с влагостойкой изоляцией. В помещениях с едкими парами и газами устанавливаются закрытые двигатели в герметическом исполнении или же закрытые, продуваемые кислотостойкой изоляцией. Во взрывоопасных помещениях, содержащих горючие газы или пары, устанавливаются взрывонепроницаемые двигатели.

Пример №5

Определить мощность, необходимую для привода механизма; выбрать электродвигатель по каталогу и произвести его проверку на перегрузочную способность. Нагрузочная диаграмма механизма изображена на рис. 19. Частота вращения вала $n_{ном}=2860$ об/мин. Двигатель должен быть установлен в помещении с запыленностью не более $2 \text{ мг} / \text{м}^3$.

Решение:

При определении мощности электродвигателя для длительной работы с переменной нагрузкой воспользуемся методом эквивалентного момента

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3 + M_4^2 t_4 + M_5^2 t_5}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}},$$

где значения моментов и соответствующие им промежутки времени определяются из рис. 19. Тогда

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{80^2 \cdot 10 + 50^2 \cdot 10 + 30^2 \cdot 10 + 100^2 \cdot 3 + 60^2 \cdot 8}{10 + 10 + 10 + 3 + 8}} = 61,9 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$\text{Расчетная мощность двигателя } P = \frac{M_{\text{э}} \cdot n_2}{9550} = \frac{61,9 \cdot 2860}{9550} = 18,57 \text{ кВт.}$$

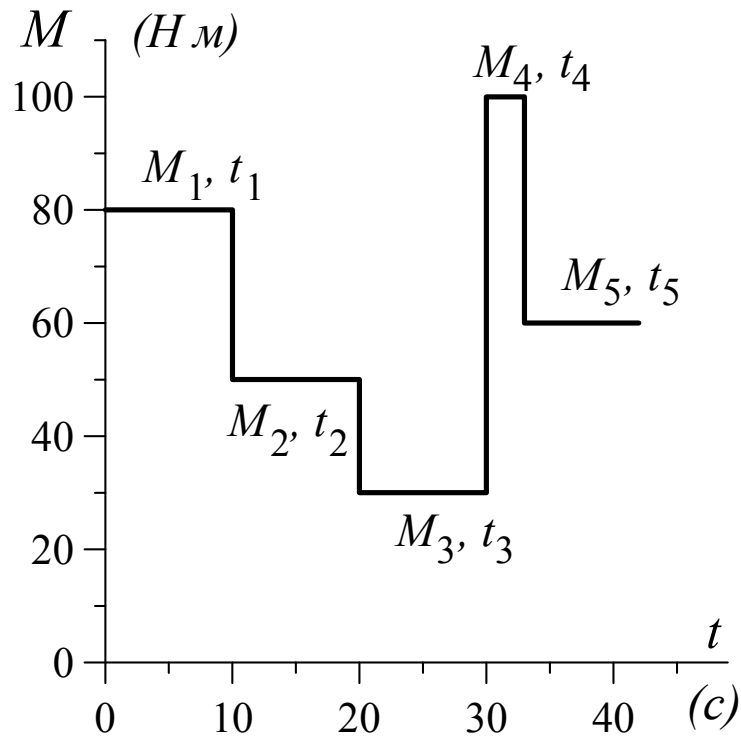


Рис. 19. Нагрузочная диаграмма исполнительного механизма

Выбираем двигатель защищенного типа 4A180S2Y3 с техническими данными: $P_{ном} = 22,0$ кВт; $n_{ном} = 2940$ об/мин; кратность максимального момента $k_m = 2,5$.

Номинальный момент двигателя, предназначенного в качестве приводного

$$M_{ном} = \frac{9,55 \cdot P_{ном}}{n_{ном}} = \frac{9,55 \cdot 22 \cdot 10^3}{2940} = 70,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Максимальный момент $M_{max} = k_m \cdot M_{ном} = 2,5 \cdot 70,4 = 176 \text{ Н} \cdot \text{м}.$

При проверке по перегрузочной способности должно выполняться условие: $M_{наиб.сopr} < k \cdot M_{max}$, где коэффициент k учитывает возможное снижение напряжения ($k = 0,9$), M_{max} – максимальный момент двигателя. Согласно рис. 19 $M_{наиб.сopr} = M_4 = 100 \text{ Н} \cdot \text{м}.$ Таким образом, заданные условия выполняются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брускин Д. Э. и др. Электрические машины и микромашины: Учеб. для электротехн. спец. вузов/ Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов.— 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1990.
2. Токарев Б. Ф. Электрические машины. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Волынский Б. А. и др. Электротехника / Б. А. Волынский, Е. Н. Зейн, В. Е. Шатерников. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. Сергеенков Б. Н. и др. Электрические машины: Трансформаторы: Учеб.пособие для электромех. спец. вузов/Б. Н. Сергеенков, В. М. Киселев, Н. А. Акимова; Под ред. И. П. Копылова. — М.: Высш.шк.,1989..
5. Справочник по электрическим машинам. В 2-х т./Под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова.— М.: Энергоатомиздат, 1988–1989.
6. Специальные электрические машины: Источники и преобразователи энергии. Учеб. пособие для вузов/ А. И. Бертинов, Д. А. Бут, С. Р. Мизюрин и др.; Под ред. А. И. Бертинова. — М., Энергоиздат, 1982.
7. Копылов И. П. Электрические машины: Учеб. для вузов. — 2-е изд., перераб.— М.: Высш. шк.; Логос; 2000.
8. Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств: Учеб. для студентов вузов, обучающихся по спец. “Электромеханика.” — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1988.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Расчет трехфазных трансформаторов	
1.1. Назначение и области применения трансформаторов	6
1.2. Паспортные данные трехфазных трансформаторов	8
1.3. Характеристики трансформаторов	10
2. Расчет двигателей постоянного тока	
2.1. Назначение и области применения двигателей постоянного тока	22
2.2. Паспортные данные двигателей постоянного тока	27
2.3. Характеристики двигателей постоянного тока	28
3. Расчет трехфазных асинхронных двигателей	
3.1. Назначение и области применения асинхронных двигателей	42
3.2. Паспортные данные трехфазных асинхронных двигателей	45
3.3. Характеристики трехфазных асинхронных двигателей	47
4. Принципы выбора электродвигателей	56
Литература	67

Людмила Владимировна Хоперскова

Электромеханические системы

Учебное пособие

Редактор Т. В. Кудясова

Темплан 2002, поз. 41

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16/

Бумага газетная. Печать офсетная. Усл.печ.л. 4,18

Уч.-изд.л. 3,48. Тираж 300 экз. Заказ .

Волгоградский государственный технический университет.

400131 Волгоград, пр. Ленина, 28.

РПК “Политехник” Волгоградского государственного технического
университета.

400131 Волгоград, ул. Советская, 35