

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Кафедра “Электротехника”

**ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С  
КОРОТКОЗАМКНУТЫМ И ФАЗНЫМ РОТОРОМ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы  
по общему курсу электротехники

ВОЛГОГРАД 2000

**УДК 621.825.7**

Исследование асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором. Методические указания к выполнению лабораторной работы по общему курсу электротехники / Сост. канд. техн. наук, доцент Г. А. Леонтьев, ст. преп. Е. Г. Зенина; Волгоград. гос. тех. ун-т.-Волгоград, 2000.- 32 с.

Методические указания содержат теоретические сведения об устройстве и принципе действия асинхронных двигателей, основных характеристиках, описывающих его работу, способах пуска двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором, описание лабораторной установки, порядок выполнения работы. Предназначены для выполнения лабораторных работ по общему курсу электротехники для студентов всех специальностей.

Лабораторная работа рассчитана на 2 часа занятий и на самостоятельную подготовку.

Ил. 7, библиогр. - 2 назв.

Рецензент А. П. Евдокимов

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

© Волгоградский государственный  
технический университет, 2000

## **1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Ознакомиться с конструкцией двигателя, изучить способы пуска трехфазных асинхронных двигателей. Научиться реверсировать и останавливать двигатель, а также снимать естественные и искусственные механические характеристики, характеристики холостого хода и рабочего режима .

## **2. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Асинхронной машиной называется машина переменного тока, у которой скорость вращения ротора отлична от скорости вращения поля. В ней используется принцип воздействия вращающегося магнитного поля на короткозамкнутый виток. Магнитная система асинхронной машины состоит из двух стальных сердечников: наружного кольцеобразного неподвижного статора и внутреннего цилиндрического вращающегося ротора. Машина имеет две обмотки, одна из которых – первичная обмотка асинхронного двигателя – размещена в пазах на внутренней стороне сердечника статора, а другая – вторичная обмотка – размещена в пазах на внешней поверхности цилиндра ротора. Для уменьшения потерь на вихревые токи оба эти сердечника собираются из листовой электротехнической стали.

При работе машины обмотка статора получает электрическую энергию из трехфазной сети; трехфазная система токов, проходящих по этой обмотке, создает вращающееся магнитное поле, вызывающее в короткозамкнутой обмотке ток. Взаимодействие этого тока с магнитным полем создает вращающий момент, заставляя ротор вращаться со скоростью не равной скорости вращения поля и производить механическую работу.

Асинхронные двигатели в основном различаются устройством ротора. Роторы асинхронных машин изготавливаются двух видов: короткозамкнутые и с контактными кольцами. Короткозамкнутые роторы проще по устройству и чаще применяются для двигателей небольшой мощности. Обмотка короткозамкнуто-

го ротора представляет собой цилиндрическую клетку – так называемое “беличье колесо” – из медных или алюминиевых стержней, замкнутых накоротко на торцах кольцами из того же материала, что и стержни. Стержни этой обмотки вставляются без изоляции в пазы ротора. Применяется также способ заливки пазов ротора расплавленным алюминием с одновременной отливкой и замыкающих колец. Таким образом, короткозамкнутые двигатели проще по конструкции, а значит, дешевле. Однако, наряду с достоинствами они обладают и существенным недостатком – у них неудовлетворительный пусковой режим в сравнении с двигателями, имеющими фазный ротор. А именно, пусковой ток у них в 4-7 раз больше номинального, а пусковой момент слишком мал, меньше номинального.

Ротор с контактными кольцами, называемый также фазным ротором, имеет обмотку, выполненную из изолированного провода, такую же трехфазную, как и в статоре, которая соединяется обычно “звездой” и выводится к контактными кольцам, расположенным на валу двигателя. По кольцам скользят щетки, через которые обмотки ротора соединяются с трехфазным реостатом. Такое устройство дает возможность изменять активное сопротивление цепи ротора, что особенно важно при пуске двигателя.

Следует отметить, что у асинхронного двигателя между его статором и ротором существует только магнитная связь, такая же, как между первичной и вторичной обмотками трансформатора. В асинхронном двигателе фазные обмотки статора подобно первичной обмотке трансформатора получают энергию из трехфазной сети. Токи обмоток статора возбуждают в машине вращающееся магнитное поле, которое вращается относительно статора со скоростью  $n_1$ :

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p}, \quad (1)$$

и определяется частотой  $f$  переменного тока и количеством пар полюсов магнитного поля  $p$ . Причем количество пар полюсов магнитного поля  $p$  определяется из условия, что каждой паре полюсов вращающегося магнитного поля соответствует три катушки на окружности статора.

Если ротор неподвижен или вращается со скоростью  $n_2 < n_1$ , то линии поля статора перемещаются относительно ротора со скоростью  $n_1 - n_2$ . По зако-

ну электромагнитной индукции в проводнике обмотки ротора наводится электродвижущая сила (ЭДС) и индуцируется ток. Взаимодействие этого тока с полем статора образует на валу двигателя момент, который стремится повернуть ротор в направлении вращения поля (т.е. является вращающим моментом). Если этот момент достаточен для преодоления нагрузочного момента на валу, то двигатель приходит во вращение со скоростью  $n_2 < n_1$  и преобразует подводимую к нему электрическую энергию в механическую.

Скорость  $n_2$ , с которой вращается ротор, должна непременно отличаться от скорости вращающегося магнитного поля  $n_1$ , так как при  $n_2 = n_1$  ротор неподвижен относительно поля статора, ЭДС в обмотке ротора и ток равны нулю и отсутствует электромагнитный момент. Относительная скорость вращения поля равна разности скоростей вращения поля  $n_1$  и ротора  $n_2$ , т.е.  $n_1 - n_2$  оборотов в минуту. Отношение ее к скорости поля

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2)$$

или в процентах

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\% \quad (3)$$

называется **скольжением** асинхронного двигателя и является одной из наиболее важных величин, определяющих его работу.

При пуске двигателя  $n_2 = 0$ , и, следовательно,  $s = 1$ ; при работе скорость вращения двигателя зависит от нагрузки и определяется формулой  $n_2 = n_1(1 - s)$ ; при холостом ходе  $n_2 \approx n_1$ , но не может достигнуть  $n_1$ . При номинальной нагрузке скольжение двигателя составляет 3–5 %, а номинальная скорость вращения ротора определяется как

$$n_{2_{н.о.м.}} = n_1(0,95 \div 0,97). \quad (4)$$

### 3. ЗАВИСИМОСТЬ ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА ОТ СКОЛЬЖЕНИЯ И МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Для устойчивой работы двигателя важно, чтобы автоматически устанавливалось равновесие вращающего и тормозящего моментов: с увеличением нагрузки на валу двигателя должен соответственно возрастать и вращающий момент. Это уравнивание у работающего асинхронного двигателя осуществляется следующим образом: при увеличении нагрузки на валу тормозящий момент оказывается больше вращающего, вследствие чего скорость вращения ротора уменьшается – скольжение возрастает. Повышение скольжения вызывает увеличение вращающего момента, и равновесие моментов восстанавливается при возросшем скольжении.

Однако зависимость вращающего момента от скольжения довольно сложна. В частности, повышение скольжения вызывает увеличение вращающего момента только при изменении скольжения в определенных пределах. За этими пределами нарушенное равновесие моментов не восстанавливается – двигатель останавливается.

Чтобы определить условия максимума момента, выразим величину вращающего момента через параметры машины:

$$M = \frac{3p}{\omega \cdot s} \left( \frac{U_1^2 R_2'}{R_1^2 + x_1^2 s^2} \right), \quad (5)$$

где  $U_1$  - фазное напряжение обмоток статора;

$R_2'$  - приведенное активное сопротивление ротора;

$R_1, x_1$  - активное и реактивное сопротивления статора;

$3p/(2\omega) = C_m$  - постоянная двигателя;

$s$  - скольжение.

Возьмем первую производную от момента по скольжению и приравняем ее к нулю:

$$\frac{dM}{ds} = 0. \quad (6)$$

Из этого выражения следует, что **критическое скольжение**  $s_k$ , соответствующее **максимальному (критическому) вращающему моменту**, определяется как:

$$S_K = \frac{R_2}{x_2}. \quad (7)$$

Характерная кривая зависимости вращающего момента двигателя от скольжения показана на рис. 1.

Максимум вращающего момента разделяет кривую вращающего момента на устойчивую часть от  $s=0$  до  $s_K$  и неустойчивую часть от  $s_K$  до  $s=1$ , в пределах которой вращающий момент уменьшается с ростом скольжения. Ввиду того что максимальный вращающий момент является границей между устойчивым и неустойчивым режимами работы двигателя, он называется также *опрокидывающим моментом*.

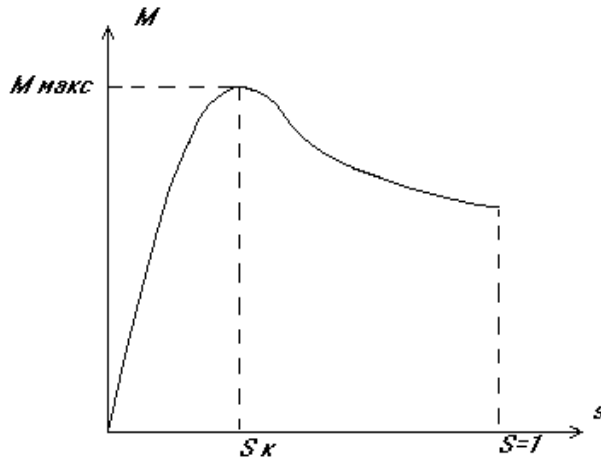


Рис. 1. Зависимость вращающего момента асинхронного двигателя от скольжения

У работающего двигателя динамическое равновесие моментов автоматически восстанавливается при увеличении скольжения, пока тормозящий момент на валу меньше максимального момента двигателя. Но когда тормозящий момент достиг значения максимального момента двигателя, тогда при дальнейшем увеличении нагрузки возрастание скольжения будет лишь уменьшать вращающий момент; таким образом, динамическое равновесие, нарушенное увеличением нагрузки, не восстанавливается, и вследствие преобладания тормозящего момента двигатель останавливается.

Выразим теперь величину максимального вращающего момента через параметры машины; для этого подставим выражение критического скольжения (7)

в уравнение момента (5), что позволяет получить выражение максимального момента асинхронного двигателя в следующей простой форме:

$$M_{\text{макс}} = \frac{3p}{2\omega} \cdot \frac{U_1^2}{2x_2}, \quad (8)$$

где  $U_1$  - фазное напряжение обмотки статора;

$3p/(2\omega) = C_m$  - постоянная двигателя;

$x_2$  - реактивное сопротивление ротора.

Максимальный момент определяет перегрузочную способность асинхронного двигателя. Выражение (8) показывает, что  $M_{\text{макс}}$  не зависит от активного сопротивления цепи ротора, в то же время критическое скольжение пропорционально этому сопротивлению (7). Следовательно, можно, увеличивая активное сопротивление цепи ротора, увеличивать критическое скольжение, не изменяя максимальный момент. Это используется для улучшения пусковых условий в двигателях с фазным ротором.

То обстоятельство, что максимальный вращающий момент пропорционален  $U_1^2$ , делает асинхронный двигатель весьма чувствительным к понижению напряжения питающей его сети. При значительном понижении  $U_1$  двигатель при пуске может не начать вращаться.

У асинхронных двигателей максимальный момент больше номинального в 2-2,5 раза.

Если в уравнении вращающего момента (5) приравнять скольжение к единице ( $s=1$ ), мы получим выражение пускового момента, т.е. момента, развиваемого двигателем в начале движения:

$$M_{\text{пуск}} = \frac{3p}{\omega} \left( \frac{U_1^2 R_2'}{R_1^2 + x_1^2} \right). \quad (9)$$

Если нужно, чтобы пусковой момент был равен максимальному, т.е. чтобы при пуске двигатель развивал максимальный момент, то согласно (8) необходимо выполнение условия:

$$R_2 = x_2, \quad \text{при} \quad S_k = 1. \quad (10)$$



Как уже указывалось, двигатель устойчиво работает только при изменении скольжения в пределах от нуля до скольжения, соответствующего максимальному; в этих условиях изменение нагрузки вызывает лишь небольшое изменение скорости вращения.

Для целей электропривода большое значение имеет зависимость скорости вращения двигателя от нагрузки на валу  $n=F(M)$ ; эта зависимость носит название **механической характеристики** (рис.2). По форме своей она отличается от кривой  $M=F(s)$  только положением по отношению к координатным осям.

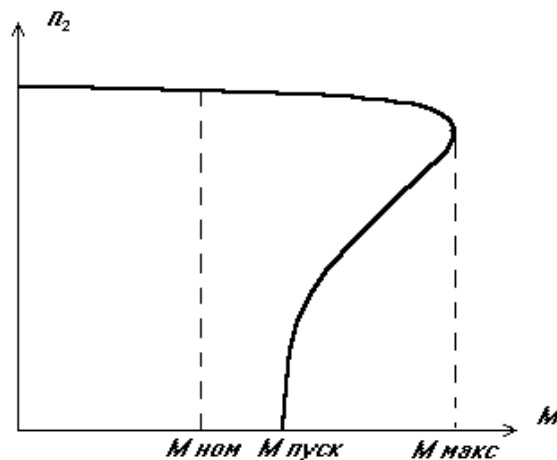


Рис. 2. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Как показывает кривая рис. 2, скорость асинхронного двигателя лишь незначительно снижается при увеличении вращающего момента в пределах от нуля до максимального значения. Такая механическая характеристика называется жесткой. В остальной своей части механическую характеристику асинхронного двигателя нужно считать мягкой.

Основным параметром, определяющим допустимую механическую перегрузку двигателя, является кратность максимального (критического) момента:

$$\lambda = \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{ном}}} \quad (11)$$

Кратность критического момента изменяется в пределах от 1,7 до 2,5. При перегрузке свыше максимального значения момента  $M_{\text{макс}}$  двигатель входит в область неустойчивого режима (если тормозящий момент на валу постоянен) и

останавливается. Это обстоятельство вынуждает выбирать двигатель таким образом, чтобы при кратковременной перегрузке не был превышен максимальный момент. Так как напряжение сети имеет значительные колебания, то наибольший допустимый момент перегрузки принимают равным  $0,85 M_{\text{макс}}$ .

Механическая характеристика, относящаяся к нормальным условиям машины, называется **естественной механической характеристикой** в отличие от **искусственной механической характеристики**, какой является, например, характеристика двигателя с фазным ротором, когда в цепь ротора включено сопротивление реостата.

#### 4. СПОСОБЫ ПУСКА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Важное практическое значение для оценки всех электродвигателей имеют их пусковые свойства. Эти свойства в основном определяются следующими величинами:

пусковым током  $I_{\text{пуск}}$ ;

пусковым моментом  $M_{\text{пуск}}$ ;

плавностью и экономичностью пускового процесса;

длительностью пуска.

В каталогах обычно указывается кратность пусковой величины, т.е. ее отношение к номинальной величине

$$k_I = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}} \quad \text{и} \quad k_M = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}} \quad . \quad (12)$$

Кратность пускового тока определяет перегрузку асинхронного двигателя по току при пуске и изменяется в пределах от 5 до 7. Кратность пускового момента обычно изменяется в пределах от 1 до 1,8.

Основными способами пуска асинхронного двигателя являются:

а) включение в сеть двигателей с короткозамкнутой обмоткой ротора при  $U_{\text{пуск}} = U_{\text{ном}}$  (прямое включение);

- б) включение в сеть двигателей с короткозамкнутой обмоткой ротора при пониженном напряжении  $U_{\text{пуск}} < U_{\text{ном}}$  ;
- в) пуск с помощью реостата, вводимого в цепь ротора двигателя с фазной обмоткой ротора.

Короткозамкнутые двигатели небольшой и средней мощности разрешается запускать при номинальном напряжении сети  $U_{\text{ном}}$ , тогда как двигатели большой мощности пускаются при пониженном напряжении  $U_{\text{пуск}} < U_{\text{ном}}$ , чтобы снизить пусковой ток.

При прямом пуске двигателя с короткозамкнутым ротором пусковой ток превышает номинальный в 4-8 раз. Скачок пускового тока для двигателей большой мощности вызывает снижение напряжения питающей сети, что плохо сказывается на работе других потребителей. Поэтому прямое включение в сеть асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором ограничивается. Такой пуск разрешается для двигателей, номинальная мощность которого составляет не более 25 % мощности питающего трансформатора. Существует два способа понижения напряжения у короткозамкнутых асинхронных двигателей:

1. Переключение обмотки статора со “звезды” на “треугольник”.
2. Понижение напряжения автотрансформатором.

Первый способ применим, если в рабочем режиме обмотки статора соединены “треугольником”. Этот способ и используется в настоящей работе. При пуске обмотки статора соединены “звездой” и статор рубильником включается в сеть. По достижении ротором установившейся скорости обмотки статора переключаются на соединение “треугольник” – этим и заканчивается пусковой режим.

Рассмотрим подробнее этот способ пуска. Пусть  $U_{\text{л}}$  –линейное напряжение;  $U_{\text{л}}$  и  $U_{\text{ф}}$  – фазные напряжения при соединении обмоток “звездой” и “треугольником”;  $I_{\text{лл}}$ ,  $I_{\text{фл}}$ ,  $I_{\text{лД}}$ ,  $I_{\text{фД}}$  – пусковые токи в линии и фазах статора при подключении его “звездой” и “треугольником”. Тогда при соединении обмотки “звездой”:

$$I_{\phi\Delta} = I_{\Delta\Delta} = \frac{U_{\Delta}}{z} = \frac{U_{\Delta}}{\sqrt{3}z}. \quad (13)$$

Если включить двигатель в сеть при соединении обмотки статора “треугольником”, то

$$I_{\phi\Delta} = \frac{U_{\Delta}}{z} = \frac{U_{\Delta}}{z} \quad \text{и} \quad I_{\Delta\Delta} = I_{\phi\Delta} \sqrt{3} = \sqrt{3} \frac{U_{\Delta}}{z}. \quad (14)$$

Разделив ( 12 ) на ( 13 ), получим

$$\frac{I_{\Delta\Delta}}{I_{\phi\Delta}} = \frac{U_{\Delta}}{\sqrt{3}z} \frac{z}{\sqrt{3}U_{\Delta}} = \frac{1}{3}. \quad (15)$$

Таким образом, пусковой ток в линии при соединении статора “звездой” в 3 раза меньше, чем при соединении “треугольником”. Это весьма важное преимущество рассматриваемого способа пуска. Однако при соединении обмоток статора “звездой” фазное напряжение в  $\sqrt{3}$  раз меньше, чем при соединении “треугольником”, а так как момент пропорционален квадрату напряжения ( $M \sim U^2$ ), то пусковой момент  $M_{\text{пуск}}$  тоже уменьшается в 3 раза. Поэтому рассматриваемый способ пуска в ход применяют там, где нагрузочный момент при пуске значительно меньше номинального.

Способ переключения “звезда-треугольник” применяется также для улучшения коэффициента мощности и КПД двигателей при малых нагрузках ( $\approx 0,4$  номин.). При этом, как известно, уменьшается фазное напряжение  $U_{\phi}$  в  $\sqrt{3}$  раз при  $U_{\Delta} = \text{const}$ , а так как  $U_{\Delta} = E_1$  и  $E_1 = \Phi$ , то  $E_1$  и  $\Phi$  также уменьшатся приблизительно в  $\sqrt{3}$  раз. Поэтому уменьшается намагничивающий ток  $I_0$  и потери в стали  $P_{\text{ст}}$  (приблизительно в 3 раза), так как они пропорциональны  $\Phi^2$ . Однако при уменьшении  $\Phi$  должен увеличиваться приведенный ток ротора  $I_2'$  при заданном вращающем моменте:

$$M = C_M I_2' \Phi. \quad (16)$$

Вместе с ростом тока  $I_2'$  растут и потери в меди ротора тоже примерно в 3 раза.

В обмотке статора будет геометрическая сумма токов - намагничивающего  $I_0$  и приведенного вторичного  $I_2'$ . При соединении обмоток “звездой” первый

уменьшается, а второй увеличивается. Поэтому при малых нагрузках главную роль играет намагничивающий ток  $I_0$ , и ток в статоре  $I_1$  уменьшается; при больших нагрузках, когда большее значение имеет  $I_2'$ , ток в статоре при соединении “звездой” может оказаться больше, чем при соединении “треугольником”. Отсюда следует, что КПД двигателя при соединении “звездой”  $\eta_{\wedge}$  мало отличается от КПД при соединении “треугольником”  $\eta_{\Delta}$ . При малых нагрузках  $\eta_{\wedge} > \eta_{\Delta}$ , но затем он падает быстрее, чем  $\eta_{\Delta}$ . Переключение со “звезды” на “треугольник” влияет, главным образом, на коэффициент мощности, который при малых нагрузках значительно возрастает.

К недостаткам данного способа относится неплавность пусковой операции, имеющей всего только две пусковые ступени и увеличение продолжительности пуска.

Для двигателей с фазной обмоткой ротора применяют пуск с помощью пускового реостата, включенного в цепь ротора.

Рассмотрим последний более подробно. Сопротивление пускового реостата выбирается таким образом, чтобы двигатель при пуске развивал максимальный момент; при этом пусковой ток ограничивается и составляет не более 1,5-2,5 от номинального. Плавность пуска достигается устройством в реостате нескольких ступеней сопротивления.

На рис.3 приведена зависимость вращающего момента двигателя от скольжения для трех сопротивлений  $R_{\Pi}$  пускового реостата.

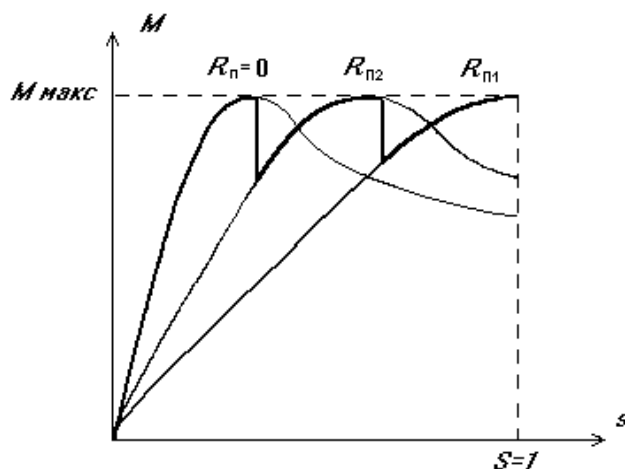


Рис. 3 Пуск асинхронного двигателя с фазной обмоткой ротора

Включение добавочного сопротивления в цепь ротора несколько изменяет характер зависимости вращающего момента  $M$  от скольжения  $s$  (рис. 3) и двигателю с фазным ротором соответствует семейство характеристик  $M=F(s)$ . При этом максимальный момент двигателя не изменяется, увеличение сопротивления смещает его в сторону большего скольжения. Таким образом, все кривые  $M=F(s)$  имеют вершину на одной высоте. Переключение ступеней пускового реостата заставляет двигатель переходить с одной характеристики на другую, при этом момент двигателя и ток изменяются по ступенчатой кривой, число ступеней которой определяется числом ступеней пускового реостата.

При включении пускового реостата сопротивлением  $R_{\text{П}}$  двигатель трогается с места при  $M_{\text{пуск}}=M_{\text{макс}}$ . По мере того, как увеличивается частота вращения двигателя, сопротивление пускового реостата уменьшают. Этому соответствует переход на новую механическую характеристику. Когда пусковой реостат полностью выведен, т. е.  $R_{\text{П}}=0$ , разгон двигателя заканчивается, и работа двигателя соответствует работе двигателя с короткозамкнутым ротором.

Применение пускового реостата значительно улучшает пусковые характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором, повышая момент и уменьшая скачок тока. К недостаткам этих двигателей стоит отнести сложность конструкции, более высокую их стоимость по сравнению с двигателями с короткозамкнутым ротором.

## 5. ХАРАКТЕРИСТИКИ ХОЛОСТОГО ХОДА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Характеристики холостого хода – это зависимости  $I_0$ ,  $P_0$ ,  $\cos \varphi_0$  от линейного напряжения  $U_0$ . Характеристики холостого хода снимаются экспериментально. Примерный их ход показан на рис. 4.

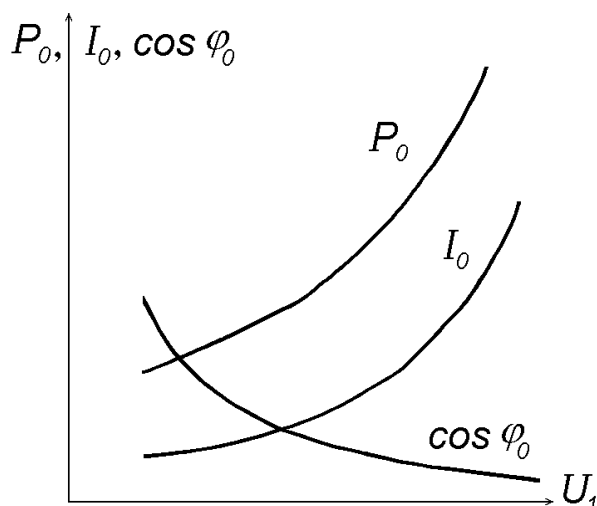


Рис. 4. Характеристики холостого хода асинхронного двигателя

Так как потребляемый при холостом ходе ток  $I_o=(0,2 \div 0,4)I_{I \text{ ном}}$  достаточно велик из-за наличия кольцевого зазора, представляющего значительное сопротивление магнитному потоку, и поэтому является чисто реактивным, то угол сдвига фаз  $\varphi_o$  тоже большой, а значит  $\cos \varphi_o$  мал.

Коэффициент мощности при холостом ходе:

$$\cos \varphi_o = \frac{P_o}{\sqrt{3}U_o I_o}, \quad (17)$$

где  $P_o$  - мощность, потребляемая при холостом ходе;

$U_o$  - линейное напряжение;

$I_o$  - линейный ток.

## 6. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Изменение различных электрических и механических параметров двигателя описывается рабочими характеристиками, под которыми понимают зависимости  $n_2, s, M_2, I_1, \cos \varphi, \eta$  от мощности  $P_2$  на валу двигателя при  $U_1=const$  и  $f=const$  (рис. 5).

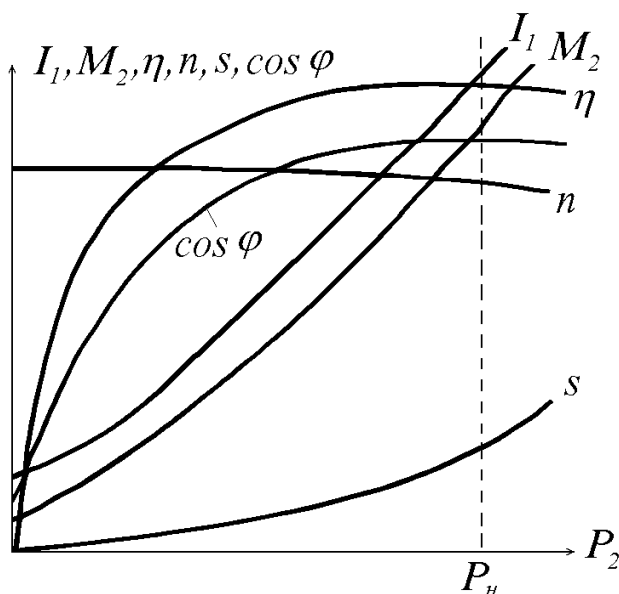


Рис. 5. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

### 1. Зависимость $n_2 = f(P_2)$ или $s = f(P_2)$

При холостом ходе, т. е. при  $P_2=0$ , ротор вращается со скоростью близкой к скорости вращения поля ( $n_2 \approx n_1$ ). С увеличением нагрузки скорость вращения ротора  $n_2$  несколько уменьшается, а скольжение  $s$  слабо возрастает. При  $P_2 = P_{2\text{ ном}}$  относительное снижение скорости составляет от 2 до 7 %, а скольжение  $s$  составляет от 1,5 до 5 %.

### 2. Зависимость $\eta = f(P_2)$

Эта характеристика имеет обычный для электрических машин и трансформаторов вид. При малых нагрузках, когда сильно сказываются постоянные потери, КПД мал. С ростом нагрузки увеличиваются переменные (тепловые) потери и при равенстве их постоянным потерям коэффициент полезного действия достигает максимума (80-96 %). Асинхронные двигатели конструируют так, чтобы максимальный КПД был при нагрузках несколько меньше  $P_{2\text{ ном}}$ . При перегрузке двигателя  $\eta$  снижается за счет превышения переменных потерь над постоянными.

КПД рассчитывается по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%, \quad (18)$$

где  $P_2$  - мощность на валу двигателя;



$P_1$  - мощность, подводимая к двигателю из сети.

### 3. Зависимость $\cos \varphi = f(P_2)$

При холостом ходе  $\cos \varphi \leq 0,2$ , но при нагрузке он довольно быстро возрастает и достигает максимума при мощности  $P_2 \approx P_{2 \text{ ном}}$ . Это объясняется тем, что при росте нагрузки до номинальной, возрастает активная составляющая тока  $I_{2a}$ , вследствие увеличения механической мощности на валу двигателя (реактивная составляющая тока  $I_{2p}$  при этом почти не изменяется, так как магнитный поток остается постоянным ( $\Phi = \text{const}$ )) угол  $\varphi$  уменьшается, а  $\cos \varphi$  увеличивается.

При перегрузке, т. е. при  $P_2 > P_{2 \text{ ном}}$ , сильно увеличиваются магнитные потоки рассеяния, поэтому реактивная составляющая тока  $I_{2p}$  растет, а вместе с ней растет и угол  $\varphi$ , а значит  $\cos \varphi$  уменьшается.

Коэффициент мощности при нагрузке рассчитывается по формуле

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} I_{\text{л}} U_{\text{л}}} . \quad (19)$$

### 4. Зависимость $I_1 = f(P_2)$

Ток статора имеет две составляющие – постоянную, являющуюся намагничивающей и совпадающей по фазе с магнитным потоком, и переменную – активную составляющую тока статора, зависящую от нагрузки. При холостом ходе ток статора равен току холостого хода, который у асинхронных двигателей достигает 40-60 % от номинального значения  $I_{1 \text{ ном}}$ . При увеличении мощности  $P_2$  увеличивается переменная составляющая тока, а вместе с ней и ток  $I_1$  увеличивается до  $I_{1 \text{ ном}}$ .

### 5. Зависимость вращающего момента $M_2 = f(P_2)$

Эта зависимость имеет такой же вид, как и  $I_1 = f(P_2)$ .

Вращающий момент рассчитывается по формуле

$$M_2 = 9,55 \cdot \frac{P_2}{n_2} . \quad (20)$$

## **7. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ**

### **7.1. ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ**

#### **УСТАНОВКА**

1. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.
2. Электромагнитный тормоз (ЭМ).
3. Индукционный регулятор трехфазного напряжения (ИРН).
4. Электроизмерительные приборы:
  - вольтметр электромагнитный;
  - амперметры электромагнитные - 2 шт.;
  - ваттметр (0-2000) Вт;
  - индикатор скорости (0-100)×25 об/мин;
  - измеритель вращающего момента  $M$ .
5. Регулятор величины нагрузки.
6. Магнитный пускатель с кнопками “пуск” и “стоп”.
7. Переключатели: однополюсный - 2 шт.;
- трехполюсный - 1 шт.

#### **ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

1. Ознакомиться с установкой. Записать в протокол паспортные данные двигателя, табл. 1.

Таблица 1

Тип двигателя	Номинальная мощность	Номинальное напряжение	Номинальная частота вращения ротора	Номинальный ток
АО	1,7 кВт	220-380 В	1440 об/мин	9,5 А

2. Собрать схему по рис. 6.

**3. Пуск двигателя путем переключения фаз статора со “звезды” на “треугольник”**

3.1. Переключатель “П1” перевести в положение “звезда”. Переключатель “П” поставить в положение “0-10 А”. Переключатель “П2” в положении “выкл”.

Рис. 6. Схема установки асинхронного двигателя  
с короткозамкнутым ротором

3.2. Включить сеть и регулятором (ИРН) установить по вольтметру напряжение 127 В.

3.3. Запустить двигатель. Для этого нажать кнопку “пуск” и записать показание (скачок стрелки) амперметра “0-10 А” в табл. 2. При достижении установившей-

ся скорости вращения двигателя, переключатель “П1” перевести в положение “треугольник” и обратить внимание на изменение тока при этом. Отключить двигатель кнопкой “стоп”.

Таблица 2

Напряжение источника 127 В		Пусковой ток $I_{п}, А$	$I_{п} ( )$ $I_{п} ( )$
Соединение обмоток статора	“звезда”		
	“треугольник”		

3.4. Установить переключатель “П” в положение “0-30 А”, а переключатель “П1” в положение “треугольник”. Запустить двигатель и записать наибольшее показание амперметра при этом в табл. 2. Отключить двигатель.

#### 4. Реверсирование двигателя

4.1. Установить переключатель “П” в положение “0-30 А”. Осуществить запуск двигателя и записать в протокол направление вращения вала двигателя. Отключить двигатель.

4.2. Поменять местами две любые фазы статора двигателя и повторить запуск двигателя (см. пп.4.1). Отключить двигатель.

4.3. Переключить фазы статора в исходное положение.

#### 5. Опыт холостого хода

5.1. Переключатель “П1” перевести в положение “треугольник”. Переключатель “П” поставить в положение “0-30 А”. Переключатель “П2” в положении “выкл”.

5.2. Включить сеть и установить ручку индукционного регулятора трехфазного напряжения (ИРН) в положение, соответствующее “100 В”. Запустить двигатель и при достижении установившейся скорости вращения переключатель “П” перевести в положение “0-10 А”. С помощью ИРН увеличивать напряжение до 220 В интервалами через 30 В. Записать показания приборов в табл. 3. Двигатель отключить.

Таблица 3

Измеренные величины				Вычисленные величины	
$n$ , дел	$U_0$ , В	$I_0$ , А	$P_0$ , Вт	$n$ , об/мин	$\cos \varphi_0$ -


Примечание.  $f=50$  Гц;  $n_1=1500$  об/мин.

5.4. По данным опыта холостого хода рассчитать:

скорость вращения ротора  $n_2=n_2(\text{дел})\times 25$ ;

коэффициент мощности  $\cos \varphi_0$  (17).

5.5. Построить и объяснить вид характеристик холостого хода

$I_o=f(U_o)$ ,  $P_o=f(U_o)$ ,  $\cos \varphi_o=f(U_o)$ .

### 6. Опыт рабочего режима

6.1. Не выключая двигателя, установить регулятор величины нагрузки в крайнее правое положение, соответствующее минимальной нагрузке на валу ротора двигателя.

6.2. Регулятором напряжения (ИРН) установить напряжение 220 В. Осуществить запуск двигателя аналогично опыту холостого хода (см. пп. 5.1-5.2). Записать показания приборов в табл. 4.

Таблица 4

Исходные данные					Вычисленные величины				
$U_1$ , В	$I_1$ , А	$P_1$ , Вт	$M$ , Нм	$n$ , об/мин	$n_2$ , об/мин	$P_2$ , Вт	$\eta$ , %	$s$ , %	$\cos \varphi_1$ -

Примечание.  $f=50$  Гц;  $n_1=1500$  об/мин.

6.3. С помощью регулятора величины нагрузки, изменяя момент вращения на валу двигателя от 0 до 7,5 Нм, плавно увеличивать нагрузку двигателя с интервалом в 200 Вт до 2000 Вт, каждый раз записывая показания приборов в табл. 4. Снять нагрузку, выключить переключатель “П2”.

6.4. По данным опыта рабочего режима рассчитать:

скорость ротора  $n_2$ ;

полезную мощность на валу двигателя определить из формулы (20):

$$P_2 = n_2 M / 9,55;$$

коэффициент полезного действия  $\eta$  – по формуле (18);

скольжение двигателя  $s$  – по формуле (3);

коэффициент мощности  $\cos \varphi_1$  – по формуле (19).

6.5. Построить и объяснить рабочие характеристики:  $n_2=f(P_2)$ ,  $s=f(P_2)$ ,  $M_2=f(P_2)$ ,  $I_1=f(P_2)$ ,  $\cos \varphi_1=f(P_2)$ ,  $\eta=f(P_2)$ .

6.6. Построить механическую характеристику двигателя  $n_2=f(M)$ .

## **7.2. ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ**

Двигатель с фазным ротором отличается от двигателя с короткозамкнутым ротором своими свойствами только при пуске. Рабочие характеристики этого двигателя аналогичны рабочим характеристикам двигателей с короткозамкнутым ротором.

### УСТАНОВКА

1. Асинхронный двигатель с фазным ротором.
2. Электромагнитный тормоз (ЭМ).
3. Индукционный регулятор трехфазного напряжения (ИРН).
4. Пусковой трехфазный реостат ( $R_{П}$ ).
5. Электроизмерительные приборы:
  - вольтметр электромагнитный (0-250 В);
  - амперметр электромагнитный (0-10 А);
  - ваттметр ферродинамический (0-2000 Вт);
  - индикатор скорости (0-100)×25 об/мин;
  - измеритель вращающего момента магнитоэлектрический (0-18 Нм).
6. Магнитный пускатель с кнопками “пуск” и “стоп”.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с установкой. Записать в протокол паспортные данные двигателя, табл. 5.

Таблица 5

Тип двигателя	Номинальная мощность	Номинальное напряжение	Номинальная частота вращения ротора	Номинальный ток
АО	1,7 кВт	220-380 В	1440 об/мин	9,5 А

2. Собрать схему по рис. 7.

Рис. 7. Схема установки асинхронного двигателя с фазным ротором

### 3. Опыт холостого хода

3.1. Перед пуском двигателя убедиться, что ручка регулятора напряжения (ИРН) находится влево до упора положении, что соответствует напряжению 220 В, а штурвал пускового реостата установлен на отметке “ноль”. Рубильник “П” источника постоянного тока установить в положение “выкл”.

3.2. Запустить двигатель. Для этого, нажав кнопку “пуск”, ступенями повернуть (по часовой стрелке) штурвал пускового реостата до упора, разгоняя двигатель. При  $U_0=220$  В записать показания приборов в табл. 6.

Таблица 6

Измеренные величины				Вычисленные величины		
$U_0,$ В	$I_0,$ А	$P_0,$ Вт	$n,$ дел.	$n_2,$ об/мин	$\cos \varphi_0$ -	$s,$ %

220						
215						
210						
205						
200						
195						
190						

Примечание.  $f=50$  Гц;  $n_1=1500$  об/мин.

3.3. С помощью регулятора напряжения (ИРН) уменьшить подводимое на фазы статора двигателя напряжение с 220 В до 190 В интервалами в 5 В, каждый раз записывая показания приборов в табл. 6.

3.4. Для остановки двигателя регулятором напряжения увеличить напряжение до 220 В, затем повернуть штурвал пускового реостата на отметку “нуль” и нажать кнопку “стоп”.

3.5. По данным опыта холостого хода рассчитать:

скорость вращения ротора  $n_2=n_2(\text{дел})\times 25$ ;

коэффициент мощности  $\cos \varphi_o$  – по формуле (17);

скольжение  $s$  – по формуле (3).

3.6. Построить и объяснить характеристики холостого хода:  $I_o=f(U_o)$ ,  $P_o=f(U_o)$ ,  $\cos \varphi_o=f(U_o)$ .

#### 4. Реверсирование двигателя

4.1. Пусковой реостат в данной работе является реверсивным, т. е. при повороте штурвала реостата влево или вправо от пусковой отметки можно изменять направление вращения ротора двигателя. Реверсирование производят на первой ступени пускового реостата ( $R_{П1}$ ). Переключение  $R_{П}$  с левого положения в правое производят после полной остановки двигателя.

4.2. Для остановки двигателя установить штурвал пускового реостата в нулевое положение и нажать кнопку “стоп”.

#### 5. Опыт рабочего режима

5.1. Осуществить запуск двигателя, как указано в опыте холостого хода. Записать показания приборов в табл. 7, что соответствует моменту нагрузки на валу двигателя  $M=0$ .

Таблица 7



Исходные данные					Вычисленные величины				
$U_1,$ В	$I_1,$ А	$P_1,$ Вт	$M,$ Нм	$n,$ об/мин	$n_2,$ об/мин	$P_2,$ Вт	$\eta,$ %	$s,$ %	$\cos \varphi_1$ -

Примечание.  $f=50$  Гц;  $n_1=1500$  об/мин.

5.2. Изменяя момент вращения на валу двигателя, увеличить нагрузку двигателя с интервалом в 200 Вт от 500 Вт до 1250 Вт, каждый раз записывая показания приборов в табл. 7.

5.3. По данным опыта рабочего режима рассчитать:

скорость ротора  $n_2=n_2(\text{дел})\times 25$ ;

полезную мощность на валу двигателя определить из формулы (20);

коэффициент полезного действия  $\eta$  – по формуле (18);

скольжение двигателя  $s$  – по формуле (3);

коэффициент мощности  $\cos \varphi_1$  – по формуле (19).

5.4. Построить и объяснить рабочие характеристики:  $M_2=f(P_2)$ ,  $n_2=f(P_2)$ ,  $\eta=f(P_2)$ ,  $s=f(P_2)$ ,  $I_1=f(P_2)$ ,  $\cos \varphi_1=f(P_2)$ .

## 6. Снятие искусственных механических характеристик

6.1. Осуществить запуск двигателя, как это было указано в пп. 3.1-3.2 опыта холостого хода, и установить штурвал пускового реостата в положение II ступени, записать показание скорости при  $M=0$  в табл. 8.

Таблица 8

Ступени пускового реостата			
I		II	
$n_2,$ об/мин	$M_2,$ Нм	$n_2,$ об/мин	$M_2,$ Нм

6.2. Включить рубильник “П”. Нагружая двигатель аналогично опыту рабочего режима (см. пп. 5.2), записать показания приборов в табл. 8.

6.3. Повторить опыт на первой ступени пускового реостата.

6.4. По данным табл. 7 и 8 построить естественную и искусственные механические характеристики двигателя  $n_2=f(M)$ .

## 8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните устройство и принцип действия асинхронных двигателей.
2. Как определяется число пар полюсов асинхронного двигателя?
3. Что такое скольжение асинхронного двигателя?
4. Чем определяется критическое скольжение?
5. Какие из способов пуска применяют для двигателей с короткозамкнутым ротором?
6. В каких случаях возможно и необходимо переключать обмотки статора со "звезды" на "треугольник" при пуске двигателя?
7. Опишите процесс пуска двигателя с фазным ротором.
8. В чем заключаются достоинства и недостатки пуска двигателя с фазным ротором?
9. От чего зависит плавность пуска двигателя?
10. Чем объяснить, что при пуске и регулировании скорости двигателя применяют активное, а не реактивное сопротивление?
11. С какой целью в асинхронном двигателе применяют фазный ротор?
12. Чем отличаются рабочие характеристики двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором?

## 9. ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин А. С., Перекалин М.А. Электротехника. - М-Л: Государственное энергетическое издательство, 1947.
2. Пиотровский Л.М. Электрические машины. - Л.: Энергия, 1975.

Составители: Геннадий Алексеевич Леонтьев;  
Елена Геннадьевна Зенина

Исследование асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором. Методические указания к выполнению лабораторной работы по общему курсу электротехники для студентов всех специальностей

Редактор Е. И. Кагальницкая

Темплан 2000 г. Поз. № 133.

Подписано к печати                      Формат 60 × 84 1/16.  
Бумага газетная. Печать офсетная. Усл. печ. л.  
Уч.- изд. л.                      Тираж 200 экз. Заказ.

Волгоградский государственный технический университет.  
400131, Волгоград, пр. Ленина, 28.

РПК “Политехник” Волгоградского государственного  
технического университета.

400131, Волгоград, ул. Советская, 35.