

Министерство образования и науки Российской Федерации
Калужский филиал федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения
высшего профессионального образования
**«Московский государственный технический университет
им. Н. Э. Баумана»**

З. Г. Широкова, М.А. Петровичев

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Электронное учебное издание

Методические указания
по выполнению домашнего задания
по курсу «Электротехника и электроника»

Калуга, 2015

УДК 621.3
ББК 31.2
Ш64

Методические указания издаются в соответствии с учебным планом направления подготовки бакалавров 27.03.05/222000.62 «Инноватика».

Методические указания рассмотрены и одобрены:
кафедрой ЭИУ7-КФ «Электротехника», протокол № 6 от 04.02.2015 г.
Зав. кафедрой ЭИУ7-КФ _____ Д. В. Мельников

Методической комиссией факультета ЭИУК,
протокол № ____ от _____ 2015 г.
Председатель методической комиссии факультета ЭИУК
_____ М. Ю. Адкин

Методической комиссией Калужского филиала МГТУ
им. Н. Э. Баумана, протокол № ____ от _____ 2015 г.
Председатель методической комиссии Калужского филиала МГТУ
им. Н. Э. Баумана _____ О. Л. Перерва

Авторы:
канд. техн. наук, доцент кафедры ЭИУ7-КФ _____ З. Г. Широкова;
ст. преподаватель кафедры ЭИУ7-КФ _____ М. А. Петровичев

Рецензент:
д-р техн. наук, профессор кафедры ЭИУ3-КФ
_____ Ю. П. Корнюшин

Методические указания содержат необходимые теоретические сведения, варианты задания и пример расчета для выполнения домашнего задания «Расчет параметров и характеристик асинхронных двигателей» по курсу «Электротехника и электроника».

Методические указания предназначены для студентов третьего курса направления подготовки бакалавров 27.03.05/222000.62 «Инноватика», а также студентов других направлений, изучающих электротехнику.

© Широкова З.Г., Петровичев М. А., 2015

ВВЕДЕНИЕ

Данные методические указания ориентированы на оказание практической помощи студентам в приобретении ими теоретических знаний и практических навыков в области расчета характеристик асинхронных двигателей.

Цель домашнего задания: освоение методики расчета параметров схемы замещения и характеристик АД с короткозамкнутым и фазным ротором, расчет параметров и характеристик АД.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В настоящее время асинхронные двигатели являются наиболее распространёнными электрическими двигателями.

Благодаря простоте конструкции, надёжности в эксплуатации трехфазные асинхронные электродвигатели получили массовое применение в устройствах автоматики и телемеханики, бытовых и медицинских приборах, устройствах звукозаписи и т.п.

Асинхронной машиной называется электрическая машина переменного тока, осуществляющая взаимное преобразование электрической и механической энергии посредством вращающегося магнитного поля. Это поле возбуждается переменным током, поступающим из сети. Существенной особенностью асинхронной машины заключается в том, что при её работе магнитное *поле и ротор вращаются с разными скоростями*.

В *режиме электрического двигателя* ротор вращается со скоростью, меньшей скорости вращения магнитного поля. В *режиме генератора* скорость вращения ротора превышает скорость вращения магнитного поля.

Электротехническая промышленность выпускает асинхронные двигатели в большом диапазоне мощностей. Предельная мощность асинхронных двигателей – несколько десятков мегаватт. В индикаторных системах применяются асинхронные двигатели мощностью от долей ватта до сотен ватт. Частота вращения двигателей общего назначения – от 3000 до 500 об/мин.

Недостатками асинхронного двигателя являются:

- Небольшой пусковой момент.
- Значительный пусковой ток.

Конструкция асинхронного двигателя

Асинхронные электродвигатели предназначены для преобразования электрической энергии переменного тока в механическую энергию. В зависимости от системы переменного тока асинхронные электродвигатели выполняются трехфазными или однофазными. В технике наиболее распространены асинхронные трехфазные электродвигатели.

Асинхронный трехфазный электродвигатель состоит из неподвижного *статора* и вращающегося *ротора* (рис. 1). *Статор*

двигателя представляет собой полый цилиндр, собранный из отдельных тонких листов электротехнической стали, изолированных друг от друга с целью уменьшения потерь мощности в магнитопроводе на гистерезис и вихревые токи. В пазах сердечника статора уложена трехфазная обмотка статора, выполненная из изолированного провода и состоящая из трех отдельных обмоток фаз, оси которых сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол 120° . Обмотки фаз соединяются между собой звездой или треугольником, в зависимости от значения подводимого напряжения.

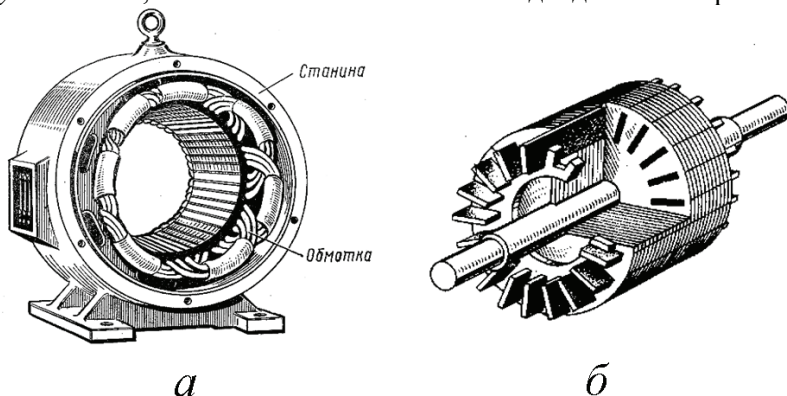


Рис. 1. Асинхронный трёхфазный электродвигатель

а – статор с обмотками;

б – короткозамкнутый ротор

Ротор асинхронного электродвигателя изготовляют в двух исполнениях: *короткозамкнутым* (см. рис. 1б) и с *контактными кольцами* (см. рис. 2а).

Короткозамкнутый ротор представляет собой ферромагнитный сердечник в виде цилиндра с пазами, в которые уложена обмотка ротора, состоящая из медных или алюминиевых стержней. Эти стержни соединяются между собой торцовыми кольцами и образуют цилиндрическую клетку. В большинстве случаев клетка ротора отливается из алюминия или из сплава на его основе. Для уменьшения потерь мощности в магнитопроводе ротор, так же как и статор, собирают из отдельных изолированных друг от друга листов электротехнической стали.

Ротор с контактными кольцами, называемый иногда также *фазным ротором*, имеет трехфазную обмотку, выполненную изолированным проводом, которая в конструктивном отношении мало чем отличается от обмотки статора двигателя. В большинстве случаев

обмотка ротора соединяется в звезду. Свободные концы обмотки подводятся к контактным кольцам ротора. В процессе работы контактные кольца скользят по неподвижным щеткам и при этом обеспечивают электрическое соединение обмотки вращающегося ротора с трехфазным неподвижным реостатом, подключенным к щеткам (рис. 2б).

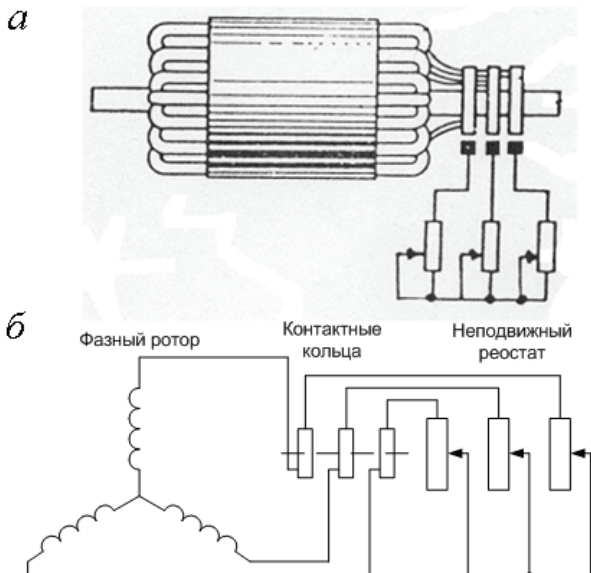


Рис. 2. Фазный ротор асинхронного электродвигателя
а – устройство ротора с контактными кольцами;

б – обозначение на схемах фазного ротора с пусковым реостатом

Такое устройство позволяет изменять активное сопротивление электрической цепи ротора асинхронного двигателя в процессе его вращения, что необходимо для уменьшения значительного пускового тока, возникаемого при пуске, а также для регулирования частоты вращения ротора и изменения пускового момента двигателя.

Принцип работы. Основные уравнения

При подаче к трехфазной обмотке статора асинхронного двигателя трехфазного напряжения в каждой его фазе будет создаваться магнитный поток, изменяющийся с частотой питающей сети. При этом потоки отдельных фаз оказываются сдвинутыми относительно друг друга на угол 120° как во времени, так и в пространстве.

Возникаемый при этом результирующий магнитный поток оказывается вращающимся, а значение *результирующего магнитного потока* $\Phi = \frac{3}{2}\Phi_m$ постоянно во времени, при этом поток вращается в пространстве с частотой вращения, равной синхронной.

Для *изменения направления вращения ротора* асинхронного двигателя необходимо изменить направление вращения магнитного поля, т. е. *изменить порядок чередования фаз обмотки статора* переключением любых двух из трех проводов, питающих двигатель от трехфазной системы напряжений.

Результирующий магнитный поток при своем вращении пересекает проводники обмотки ротора и наводит в них ЭДС (закон электромагнитной индукции Фарадея). Так как обмотка ротора асинхронного двигателя имеет замкнутую электрическую цепь, в ней возникает ток, который, *взаимодействуя с магнитным потоком статора, создает электромагнитный момент двигателя* (закон Ампера). Под действием этого момента ротор вращается в сторону вращающегося магнитного потока двигателя, причем частота вращения ротора двигателя всегда меньше частоты вращения вращающегося магнитного поля. Если ротор вращается с частотой поля, то его обмотка не пересекается этим полем и в ней не наводится ЭДС. *Следовательно, при отсутствии тока в роторе электромагнитный момент двигателя равен нулю.* При этом двигатель замедляет свой ход до тех пор, пока в роторе не появится ток, необходимый для обеспечения соответствующего момента, и двигатель продолжает вращаться при этой частоте вращения.

Частота вращения магнитного поля n_1 (синхронная частота вращения) находится в строгой зависимости от *частоты f_1* подводимого напряжения и *числа пар полюсов p* двигателя:

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

Из этого следует, что при принятой в России промышленной частоте питающего напряжения ($f = 50\text{ Гц}$) наибольшее число оборотов магнитного поля оказывается равным 3000 об/мин при $p = 1$. При увеличении числа пар полюсов частота вращения магнитного поля уменьшается, а следовательно, снижается и частота вращения ротора двигателя.

Асинхронный электродвигатель характеризуется номинальными данными, на которые он рассчитан. Основные технические данные двигателя указываются в соответствующих каталогах, а также в паспортах, выполненных в виде специальных табличек, закрепленных на корпусах двигателей.

Асинхронные трехфазные электродвигатели имеют шесть выводов обмотки статора (три начала и три конца обмоток фаз). Начала обмоток каждой из трех фаз маркируются C_1, C_2, C_3 , а концы соответственно C_4, C_5, C_6 .

Подобная конструкция *обмотки статора* дает возможность *соединять* обмотки фаз двигателя как *треугольником*, так и *звездой*. Благодаря этому каждый трехфазный электродвигатель можно использовать при двух различных по значению напряжениях питающей сети (*линейном и фазном*, см. *трёхфазные цепи*).

Одним из важнейших показателей, характеризующих работу асинхронного двигателя, является скольжение ротора, под которым понимается отношение

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1},$$

где n_2 – частота вращения ротора электродвигателя, об/мин.

Для большинства современных типов асинхронных электродвигателей скольжение ротора при номинальной нагрузке составляет 2–6%, а при работе в *режиме холостого хода*, т. е. когда *электродвигатель работает без нагрузки на валу*, доли процента.

При вращении ротора с частотой вращения поля его скольжение оказывается равным нулю ($s=0$). При частоте вращения ротора, равной нулю, т. е. при неподвижном роторе, скольжение ротора равно единице ($s=1$).

Разность частот вращения $n_1 - n_2 = sn_1$ представляет собой частоту скольжения, т. е. частоту вращения вращающегося поля статора двигателя относительно его ротора. *Нетрудно видеть, что от частоты скольжения, а также от абсолютного значения магнитного потока, характеризующего вращающееся магнитное поле, зависит и значение ЭДС, наводимой в обмотке ротора, а следовательно, ток ротора и его частота:*

$$f_{2s} = \frac{pn_1s}{60} = sf_1.$$

При увеличении нагрузки на валу электродвигателя, обусловленной возрастанием момента сопротивления, частота вращения ротора уменьшается, а скольжение его возрастает. Это вызывает увеличение ЭДС ротора E_{2s} , а следовательно, токов ротора и статора асинхронного двигателя. При этом мощность P_1 , потребляемая из сети, также возрастает.

При неподвижном роторе вращающееся магнитное поле в обмотках статора и ротора асинхронного электродвигателя будет наводить переменные ЭДС, действующие значения которых можно определить по формулам, аналогичным формулам, полученным для ЭДС трансформатора:

$$E_1 = 4,44k_1f_1\omega_1\Phi_m,$$

$$E_2 = 4,44k_2f_2\omega_2\Phi_m,$$

где E_1 – фазное значение ЭДС, наводимой в обмотке статора;
 E_2 – фазное значение ЭДС, наводимой в обмотке ротора при неподвижном его состоянии ($s = 1; n_2 = 0$);
 ω_1, ω_2 – число витков в фазе статора и ротора;
 Φ_m – амплитудное значение магнитного потока фазы.
 k_1, k_2 – обмоточные коэффициенты статора и ротора.

В отличие от трансформатора, вследствие конструктивных особенностей асинхронного двигателя, вращающийся магнитный поток не будет одновременно сцеплен со всеми витками обмоток статора и ротора, что учитывается обмоточными коэффициентами k_1 и k_2 , меньшими единицы (у трансформатора $k_1 = k_2 = 1$).

При вращении ротора двигателя в процессе работы в нем наводится переменная ЭДС с частотой f_{2s} значение которой можно найти путем замены в выражении для E_2 частоты $f_2 = f_1$ на f_{2s} .

$$E_2 = 4,44k_2f_{2s}\omega_2\Phi_m = 4,44k_2f_1s\omega_2\Phi_m = sE_2.$$

Отсюда следует, что ЭДС вращающегося ротора находят по ЭДС неподвижного ротора, умножая ее значение на скольжение, соответствующее данной частоте вращения ротора электродвигателя.

При работе асинхронного электродвигателя под действием ЭДС E_{2s} , возникающей во вращающемся роторе, в цепи обмотки ротора возникает ток I_{2s} , который в соответствии с законом Ома для данной цепи можно найти, исходя из выражения

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{Z_{2s}} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}},$$

где Z_{2s} – полное сопротивление фазы ротора;

R_2 – активное сопротивление фазы ротора;

X_{2s} – индуктивное сопротивление фазы ротора при данных скольжениях ротора и частотах тока ротора.

С учетом того, что $E_{2s} = sE_2$ и $X_{2s} = 2\pi f_{2s}L_2 = sX_2$, получаем выражение для ротора в другом виде:

$$I_{2s} = \frac{sE_2}{\sqrt{(R_2/s) + X_2^2}} = I_2.$$

Из формулы видно, что ток ротора вращающегося двигателя можно определить через ЭДС неподвижного ротора. Сопротивление X_2 , входящее в выражение для тока ротора, соответствует частоте f_1 и является постоянным, а активное сопротивление электрической цепи ротора при этом зависит от скольжения и находят его как отношение

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right).$$

С учетом этого и выражения для тока ротора схема замещения вращающегося ротора асинхронного электродвигателя может быть приведена к схеме замещения неподвижного ротора, представленной на рис. 3.

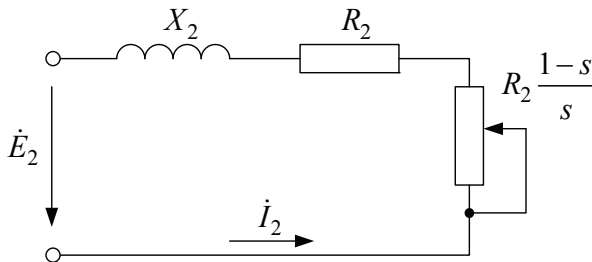


Рис. 3. Схема замещения неподвижного ротора асинхронного электродвигателя

При построении схемы замещения асинхронного электродвигателя, приводят к числу витков и ЭДС обмотки статора электродвигателя. В

результате полная схема замещения асинхронного электродвигателя имеет вид, показанный на рис. 4.

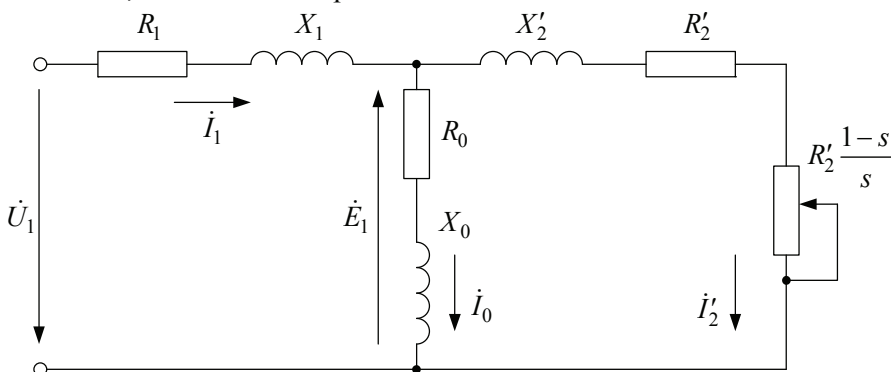


Рис. 4. Полная схема замещения асинхронного электродвигателя

Энергетика асинхронного двигателя

Представление о распределении потока энергии, потребляемой асинхронным электродвигателем из сети, дает энергетическая диаграмма (см. рис. 5), на которой дана полная структура потерь мощности, возникающих при работе в асинхронном электродвигателе:

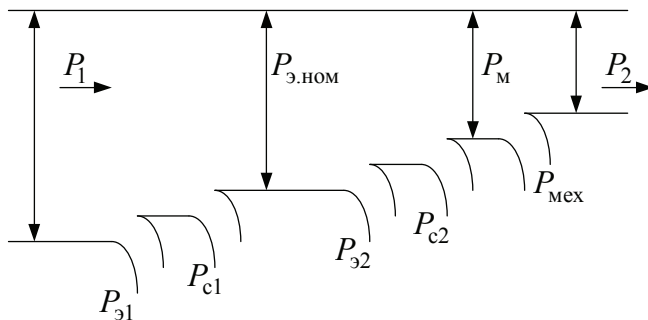


Рис. 5. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1$ – активная мощность, подводимая к электродвигателю из сети;

$P_{\Sigma 1} = m_1 I_1^2 R_1$ – электрические потери мощности в активном сопротивлении обмотки (*потери в меди*) статора; где m_1 – число фаз обмотки статора; I_1 – ток фазы статора;

$P_{c1} = P_{m1} = P_r + P_b$ – потери мощности в магнитопроводе статора, равные сумме потерь мощностей на гистерезис и вихревые токи (*потери в стали статора*);

$P_{\Sigma M} = \Omega_1 M = m_2 E_2 I_2 \cos \psi_2$ – электромагнитная мощность, передаваемая ротору вращающимся магнитным полем, здесь m_2 – число фаз обмотки ротора; E_2 – ЭДС неподвижного ротора; I_2 – фазный ток ротора; ψ_2 – угол между током и ЭДС ротора; $\Omega_1 = 2\pi n_1 / 60 = \omega_1 / p$ – угловая частота вращения магнитного поля статора;

$P_{c2} = P_{m2}$ – потери мощности в магнитопроводе ротора, равные сумме потерь мощностей на гистерезис и вихревые токи в роторе;

$P_{\Sigma 2} = m_2 I_2^2 R_2$ – электрические потери мощности в обмотках (*потери в меди*) ротора, где I_2 – фазный ток ротора;

$P_{\text{мех}}$ – механические потери мощности в двигателе (потери мощности, возникаемые от трения в подшипниках и трения ротора о воздух);

$P_M = \Omega_2 M$ – мощность, развиваемая электродвигателем с учетом механических потерь мощности в нем;

$P_2 = M n_2 / 9,55$ – полезная мощность на валу электродвигателя.

$\Omega_2 = \frac{2\pi n_2}{60} = \frac{\omega_2}{p}$ – угловая частота вращения ротора двигателя.

Электромагнитный момент асинхронного двигателя

Электромагнитный момент, развиваемый асинхронным электродвигателем, можно получить, исходя из его электромагнитной мощности:

$$P_{\Sigma M} = m_2 E_2 I_2 \cos \psi_2 = 4,44 k_2 m_2 f_1 \omega_2 \Phi_m I_2 \cos \psi_2 = \frac{\omega_1}{p} M,$$

откуда электромагнитный момент

$$M = c \Phi_m I_2 \cos \psi_2,$$

где постоянная $c = 4,44k_2m_2pf_1(\omega_2/\omega_1)$.

Из формулы видно, что момент асинхронного электродвигателя пропорционален произведению вращающегося магнитного потока на ток ротора и косинус угла сдвига по фазе между током ротора и его ЭДС.

Вращающий момент асинхронного двигателя можно определить и исходя из электрических потерь мощности в обмотках ротора. При этом находят сумму электрических потерь мощности в обмотках трех фаз:

$$P_{\text{з2}} = m_2 I_2^2 R_2 = P_{\text{эм}} - P_{\text{мех}} = M \frac{\omega_1 s}{p},$$

откуда

$$M = \frac{pm_2 I_2^2 R_2}{\omega_1 s} = \frac{pm_1 (I_2')^2 R_2'}{\omega_1 s}.$$

Из полученного выражения следует, что электромагнитный момент асинхронного электродвигателя пропорционален электрическим потерям в обмотках ротора.

При скольжении ротора $s=1$ пусковой момент асинхронного двигателя (при $n_2 = 0$)

$$M_{\text{пуск}} = \frac{pm_1 (I_2')^2 R_2'}{\omega_1}.$$

Приведенный ток ротора I_2' можно выразить через параметры схемы замещения асинхронного электродвигателя (см.рис. 4) с учетом того, что полное сопротивление намагничивающего контура намного больше полного сопротивления обмотки статора двигателя, т. е.

$$z_0 = \sqrt{R_0^2 + X_0^2} \gg Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2},$$

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}}.$$

С учетом, полученного выражения для тока ротора I_2 получаем формулу для момента асинхронного электродвигателя:

$$M = \frac{pm_1 R'_2}{\omega_1 s} \frac{U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}.$$

Из формулы видно, что момент асинхронного электродвигателя пропорционален квадрату подводимого напряжения и зависит от скольжения ротора. Причем имеется такое скольжение ротора, при котором электродвигатель развивает наибольший (*критический*) момент M_k . Максимальное (*критическое*) скольжение s_k ротора, соответствующее критическому моменту асинхронного электродвигателя, можно найти, взяв производную момента по скольжению (пренебрегая активным сопротивлением обмотки статора R_1 вследствие его относительной малости и приравняв ее нулю. При

этом $s_k = \frac{R'_2}{X_1 + X'_2}.$

Подставив скольжение ротора s_k , в формулу для момента (с учетом того, что $R_1 = 0$), получаем выражение для критического момента асинхронного электродвигателя:

$$M_k = \frac{pm_1 U_2}{2\omega_1 (X_1 + X'_2)}.$$

В результате совместного решения приведенных уравнений получаем выражение для момента асинхронного электродвигателя, записанное через критические момент и скольжение ротора:

$$M = \frac{2M_k}{\left(\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}\right)}.$$

Зависимость момента асинхронного двигателя от скольжения ротора $M(s)$, построенная согласно полученному уравнению, имеет вид, представленный на рис. 6а. Эта зависимость фактически является механической характеристикой асинхронного электродвигателя (рис. 6б), так как частота вращения ротора связана с его скольжением выражением $n_2 = n_1 (1 - s)$.

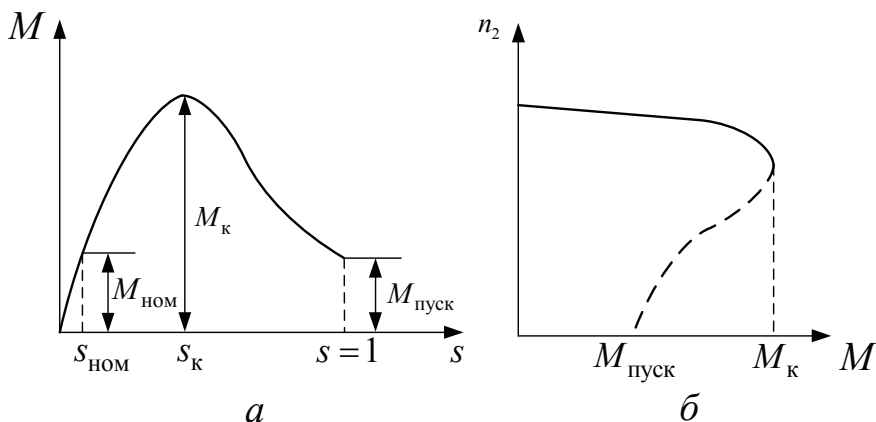


Рис. 6. Механические характеристики асинхронного электродвигателя
а – зависимость момента АД от скольжения ротора, $M(s)$;
б – зависимость оборотов АД от момента, $n_2(M)$

Анализ характеристик асинхронного двигателя

Анализ показывает, что в интервале скольжений от $s=0$ до $s=s_K$ механическая характеристика будет устойчивой, так как $dM/ds > 0$, т. е. при возрастании момента нагрузки на валу происходит возрастание момента, развиваемого электродвигателем. В то же время в интервале скольжений от $s=s_K$ до $s=1$ механическая характеристика асинхронного двигателя оказывается неустойчивой, так как $dM/ds < 0$.

Так как между скольжением ротора и частотой вращения асинхронного электродвигателя существует прямая взаимосвязь, то, записав скольжение через частоту вращения ротора, представим зависимость частоты вращения асинхронного двигателя от момента в виде кривой $n_2(M)$, также называемой *механической характеристикой асинхронного двигателя* (рис. 6б).

Зависимости момента M , потребляемой мощности P_1 , коэффициента мощности $\cos \varphi$, КПД η , скольжения ротора s и тока статора I_1 , потребляемого двигателем из сети, от полезной мощности,

т. е. мощности на валу двигателя P_2 , являются *рабочими характеристиками асинхронного электродвигателя*. (см. рис. 7)

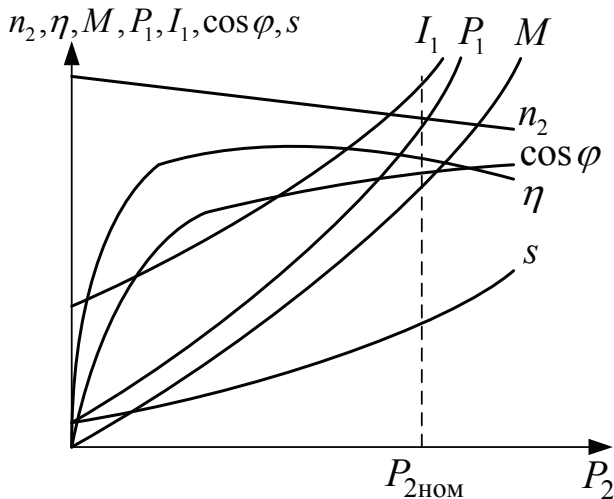


Рис.7. Рабочие характеристики асинхронного электродвигателя

При этом зависимость $M(P_2)$ определяется формулой $M = 9,55 P_2 / n_2$, из которой следует, что эта зависимость представляет собой несколько искривленную прямую, проходящую через начало координат, так как с изменением нагрузки на валу частота вращения ротора двигателя несколько уменьшается.

Характер зависимости $\cos \varphi(P_2)$, т. е. зависимости коэффициента мощности асинхронного двигателя от мощности на валу, определяется выражением

$$\cos \varphi = \frac{P_2}{\sqrt{3} U_1 I_1}.$$

Значение коэффициента мощности для нормальных асинхронных двигателей средней мощности при номинальной нагрузке составляет $0,83 - 0,89$. С уменьшением нагрузки на валу двигателя коэффициент мощности снижается и доходит до значений $0,2 - 0,3$ при холостом ходе. В этом режиме полезная мощность на валу равна нулю, однако при этом двигатель потребляет мощность из сети, поэтому коэффициент мощности здесь не равен нулю. С увеличением нагрузки сверх номинальной наблюдается некоторое снижение значения коэффициента мощности за счет увеличения падения напряжения на

индуктивной составляющей сопротивления обмотки статора асинхронного двигателя. Характер изменения коэффициента мощности от нагрузки асинхронного двигателя имеет примерно такой же вид и изменяется по тем же причинам, что и у трансформатора.

Зависимость КПД асинхронного двигателя от нагрузки $\eta(P_2)$ определяется формулой

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{(P_2 + P_{\Sigma})},$$

где P_1 – активная мощность, потребляемая двигателем из питающей сети; $P_{\Sigma} = P_{\text{м}} + P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}$ – суммарные потери мощности в двигателе, равные сумме потерь мощности в магнитопроводе, электрических потерь мощности в обмотках статора, электрических потерь мощности в обмотке ротора, механических потерь и добавочных потерь мощности. При отсутствии нагрузки $P_2 = 0$, поэтому КПД электродвигателя при этом также равен нулю.

С увеличением нагрузки КПД двигателя растет и принимает наибольшее значение при условии, что постоянные потери мощности в электродвигателе $(P_{\text{м}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}})$ оказываются равными переменным потерям мощности $(P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}})$ в нем. При дальнейшем росте нагрузки КПД электродвигателя, так же как и у трансформатора, снижается. Ток статора при отсутствии нагрузки равен току холостого хода $(I_1 = I_0)$. При увеличении мощности на валу электродвигателя возрастает и ток I_1 , потребляемый двигателем из питающей сети. Увеличение тока происходит приблизительно по линейному закону. Однако при значительном возрастании мощности на валу линейность нарушается и ток начинает возрастать более интенсивно, чем мощность, так как коэффициент мощности двигателя при этом снижается, а электрические потери мощности в обмотках двигателя при больших нагрузках значительно возрастают. Снижение $\cos \varphi$ и увеличение потерь мощности в двигателе компенсируются увеличением тока вследствие возрастания мощности. Этим же объясняется и характер изменения потребляемой из сети мощности $P_1(P_2)$.

С увеличением мощности на валу, т.е. с увеличением нагрузки двигателя, вызываемой возрастанием момента сопротивления

исполнительного механизма, частота вращения (число оборотов) ротора уменьшается, а его скольжение при этом возрастает, вызывая увеличение ЭДС E_2 в обмотках ротора, а следовательно, возрастание токов ротора и статора. При неизменном магнитном потоке двигателя это приводит к увеличению момента, развиваемого двигателем. Таким образом, с увеличением нагрузки на валу равновесие между моментом, развиваемым двигателем, и моментом сопротивления наступает при снижении частоты вращения. При возрастании мощности на валу электродвигателя происходит снижение частоты вращения ротора.

Пуск асинхронного двигателя

При включении асинхронного электродвигателя в питающую сеть обмотка статора, создает вращающееся магнитное поле. В момент пуска частота вращения ротора электродвигателя равна нулю, в то время как *вращающееся поле* вследствие того, что оно *безынерционно*, мгновенно приобретает синхронную частоту вращения по отношению к ротору, в результате в обмотке ротора наводится большая ЭДС. При этом токи ротора и статора в несколько раз превосходят номинальные их значения, так как они увеличиваются с увеличением скольжения ротора, т. е. с уменьшением его частоты вращения (рис. 8).

Пусковой ток асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором в 5 — 10 раз превышает номинальный (*пусковой момент* составляет 1,1–1,8 от номинального значения момента). Так как этот ток протекает по обмоткам электродвигателя кратковременно, только в процессе пуска, он не опасен для двигателя в тепловом отношении, если пуски двигателя не очень часты. Поэтому пуск асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, как правило, производится прямым включением в сеть, на полное напряжение.

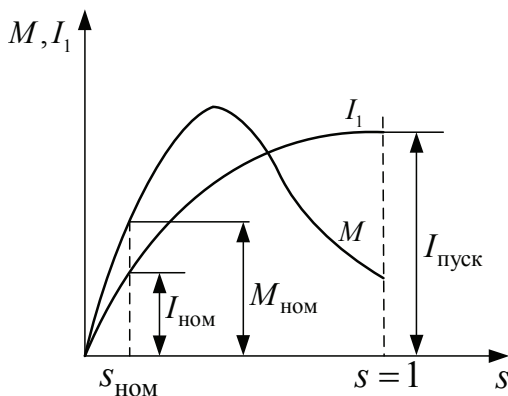


Рис. 8. Пусковые характеристики асинхронного двигателя

Однако большой пусковой ток крупных электродвигателей опасен не только для самого двигателя, он может вызвать значительное снижение напряжения, особенно в маломощных питающих сетях, что отрицательно сказывается на работе других потребителей электроэнергии, подключенных к той же сети. В этих случаях возникает необходимость ограничивать пусковой ток асинхронных электродвигателей при включении их в питающую сеть.

Снижение напряжения на обмотках асинхронного электродвигателя при пуске может быть достигнуто различными способами: а) пуском с использованием автотрансформатора или индукционного регулятора; б) пуском с переключением обмотки статора со звезды на треугольник; в) пуском с включением дополнительного сопротивления в обмотку статора двигателя. Однако при снижении напряжения при пуске пусковой момент асинхронного двигателя резко снижается, так как он пропорционален квадрату значения питающего напряжения. Поэтому указанные способы пуска, как правило, применяются для приводных двигателей тех механизмов, для пуска которых не требуется большой пусковой момент (при пуске двигателя вхолостую или двигателя вентилятора и других механизмов).

Асинхронный электродвигатель с фазным ротором пускают в ход с помощью пускового реостата, включенного последовательно с обмоткой ротора (см. рис. 2б). В начальный момент пусковое активное сопротивление реостата вводится в цепь двигателя полностью. С увеличением оборотов частота вращения вращающегося

магнитного поля по отношению к ротору уменьшается. Соответственно уменьшаются ЭДС и ток ротора. Поэтому с увеличением частоты вращения двигателя можно постепенно уменьшать значение пускового сопротивления в цепи обмотки ротора, не опасаясь того, что ток двигателя возрастет до значений, опасных для него. При полностью выведенном сопротивлении пускового реостата пуск двигателя заканчивается.

Такой способ позволяет обеспечить необходимый для пуска пусковой момент двигателя. Значение пускового момента зависит от значения активного сопротивления в цепи ротора и может быть доведено до критического момента M_k двигателя.

Регулирование частоты вращения

Существенный недостаток асинхронных электродвигателей – относительно сложное регулирование частоты их вращения.

Возможные способы регулирования частоты вращения асинхронных электродвигателей можно установить в результате анализа выражения, записанного относительно частоты вращения ротора двигателя:

$$n_2 = \frac{60f_1(1-s)}{p}$$

Анализ этой формулы показывает, что частоту вращения асинхронного двигателя можно изменить, меняя скольжение ротора s , число пар полюсов p двигателя или частоту f_1 питающего напряжения.

Регулирование частоты вращения изменением скольжения производят изменением активного сопротивления в цепи ротора (для асинхронных двигателей с фазным ротором), в обмотку которого (с помощью контактных колец) включают добавочное сопротивление.

При увеличении активного сопротивления цепи ротора значение критического скольжения ротора двигателя s_k в соответствии с приведенной ранее формулой увеличивается.

При этом можно получить семейство механических характеристик электродвигателя при разных добавочных сопротивлениях (см. рис. 9), из которых видно, что при постоянном моменте нагрузки на валу электродвигателя с увеличением активного сопротивления в цепи ротора рабочая точка смещается с одной механической

характеристики на другую, соответствующую новому, возросшему сопротивлению цепи ротора. Происходит увеличение скольжения ротора, а следовательно, уменьшение частоты вращения ротора асинхронного двигателя.

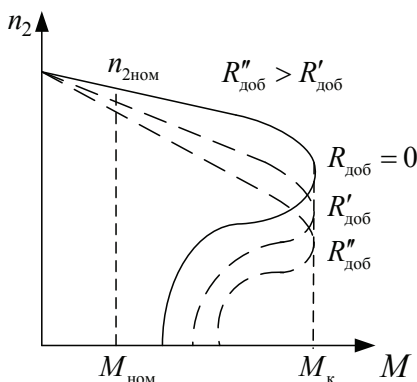


Рис. 9. Регулирование частоты вращения изменением скольжения (для асинхронного двигателя с фазным ротором)

При рассматриваемом способе возможно регулирование частоты вращения двигателя в пределах от номинального значения $n_{ном}$ до его значения, равного нулю. Однако при этом возникают значительные потери мощности в дополнительном активном сопротивлении цепи ротора, пропорциональные квадрату тока ротора, что делает этот способ неэкономичным.

Регулирование частоты вращения асинхронных короткозамкнутых электродвигателей изменением скольжения может быть достигнуто за счет уменьшения напряжения на зажимах двигателя. При этом критический момент асинхронного двигателя уменьшается, жесткость механической характеристики также уменьшается, а скольжение ротора двигателя при том же моменте нагрузки возрастает. Происходит уменьшение частоты вращения электродвигателя. Регулирование асинхронного двигателя при этом способе возможно только в незначительном диапазоне скольжений, который ограничивается критическим моментом и скольжением ротора.

Следует отметить, что при уменьшении напряжения происходит резкое снижение критического момента двигателя, пропорционального квадрату напряжения, а следовательно, резкое уменьшение перегрузочной способности двигателя по кратности

критического момента, что ограничивает область применения этого способа.

Регулирование частоты вращения асинхронных короткозамкнутых двигателей, как указывалось, возможно путем изменения числа пар полюсов, что применимо для многоскоростных двигателей. Сущность этого заключается в том, что при постоянной частоте напряжения питающей сети частота вращения асинхронного двигателя зависит от числа пар полюсов обмотки статора. Таким образом, если на статоре асинхронного двигателя разместить две или несколько отдельных обмоток с разными числами пар полюсов, то при включении в сеть каждой из обмоток в отдельности можно получить различные частоты вращения вращающегося магнитного поля и вращения ротора.

Для увеличения диапазона регулирования частоты вращения поля статор асинхронного двигателя снабжается двумя независимыми обмотками, каждая из которых может переключаться на число пар полюсов в отношении 1:2. В этом случае асинхронный двигатель будет иметь четыре ступени скорости (рис. 10). Кроме электродвигателей, рассчитанных на одну частоту вращения, отечественная промышленность выпускает двух-, трех- и четырехскоростные асинхронные короткозамкнутые электродвигатели с соответствующим числом пар полюсов.

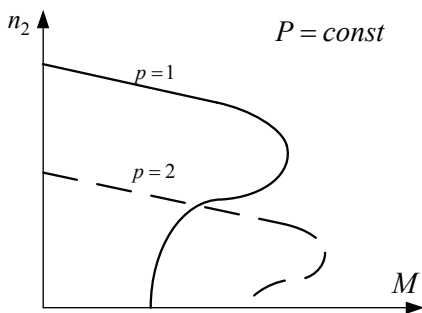


Рис. 10. Регулирование частоты вращения изменением числа пар полюсов

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей путем переключения числа пар полюсов производится без потерь мощности. Однако многоскоростные электродвигатели гораздо сложнее по конструкции и дороже обычных односкоростных. При этом

регулирование частоты вращения оказывается ступенчатым, неплавным.

Регулирование частоты вращения асинхронных электродвигателей может быть осуществлено и путем изменения частоты напряжения, подводимого к обмотке статора. При этом происходит изменение частоты вращения вращающегося магнитного поля и частоты вращения ротора электродвигателя (рис. 11).

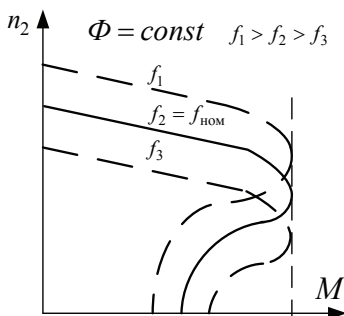


Рис. 11. Регулирование частоты вращения изменением частоты питающей сети

Существенным недостатком частотного способа регулирования является необходимость применения специального оборудования, что значительно усложняет систему электропривода. Однако с развитием полупроводниковой техники, появления частотных преобразователей этот способ нашел широкое применение.

ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ

Дано:

Тип двигателя	4AK250M6УЗ
Номинальная мощность	$P_n = 45 \text{ кВт}$
Синхронная частота вращения	$n_1 = 1000 \text{ об/мин}$
Напряжение ротора	$U_{2н} = 180 \text{ В}$
Номинальный ток ротора	$I_{2н} = 160 \text{ А}$
Перегрузочная способность	$\lambda = M_k / M_n = 2,5$
Номинальное скольжение	$s_n = 3 \%$

Задание: Рассчитать значения характеристик АД при номинальных значениях напряжения питания электрической сети. Построить рабочие характеристики АД, а также графики механической и электромеханической характеристик.

Решение:

Построение механических характеристик асинхронного двигателя

1. Определим номинальную частоту вращения ротора:

$$n_n = n_1 (1 - s_n) = 1000(1 - 0,03) = 970 \text{ об/мин}.$$

2. Определим номинальный электрический момент:

$$M_n = 9,55 \frac{P_n}{n_n} = 9,55 \frac{45000}{970} = 443 \text{ Нм}.$$

3. Найдём критический момент:

$$M_k = \lambda M_n = 2,5 \cdot 443 = 1107,5 \text{ Нм}.$$

4. Критическое скольжение естественной характеристики:

$$s_k = s_n \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = 0,03 \left(2,5 + \sqrt{2,5^2 - 1} \right) = 0,144 = 14,4 \%$$

5. Задаваясь скольжением s (см. таблицу 1), можно построить естественную и искусственные характеристики асинхронного двигателя. Под *естественной характеристикой* понимают зависимость момента двигателя M от его скольжения s при номинальной схеме включения двигателя, номинальных параметрах

питающей сети ($U_{\text{лн}}, f_{\text{лн}}$), и отсутствии добавочных сопротивлений в цепях двигателя. Остальные характеристики называются *искусственными*.

Механический момент для естественной характеристики определяется:

$$M = \frac{2M_{\text{к}}}{\left(\frac{s}{s_{\text{к}}} + \frac{s_{\text{к}}}{s} \right)},$$

а для искусственных механических характеристик:

$$M_{\text{и}(1,2)} = \frac{2M_{\text{к}}}{\left(\frac{s}{s_{\text{ки}(1,2)}} + \frac{s_{\text{ки}(1,2)}}{s} \right)}$$

где $s_{\text{ки1}} = 0,5$; $s_{\text{ки2}} = 0,7$ (смотри таблицу 1).

6. Для определения частоты вращения ротора через скольжения воспользуемся выражением:

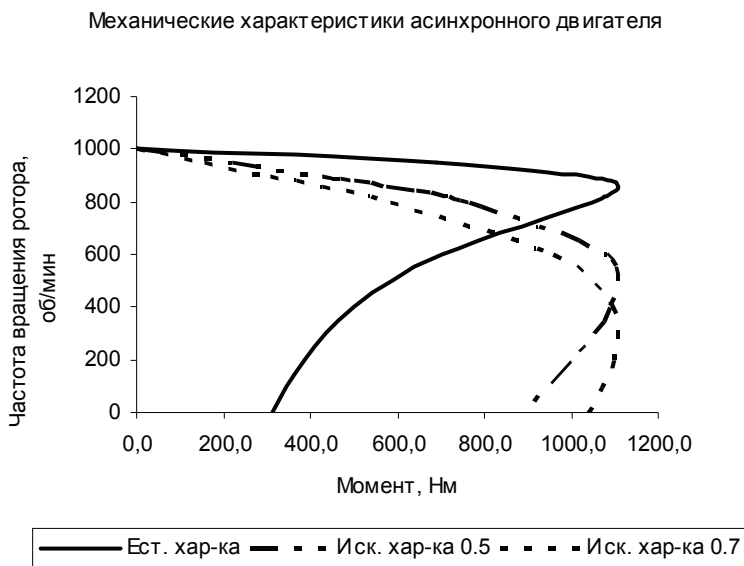
$$n_2 = n_1 (1 - s).$$

Таблица 1

Механические характеристики

Скольжение s	Частота вращения ротора, n_2	Момент ест. харак - ки $M, (s_{\text{к}} = 0,144)$	Момент иск. харак - ки $M_{\text{и1}}, (s_{\text{ки1}} = 0,5)$	Момент иск. харак - ки $M_{\text{и2}}, (s_{\text{ки2}} = 0,7)$
0,0	1000	0	0	0
0,05	950	687	219	157
0,1	900	1038	426	310
0,12	880	1090	503	369
0,14	860	1107	575	426
0,16	840	1101	643	481
0,18	820	1080	706	534
0,2	800	1050	764	585
0,4	600	705	1081	954
0,6	400	502	1089	1095
0,8	200	386	996	1098
1	0	312	886	1041

7. По результатам таблицы 1 (например в Microsoft Office Excel 2003) строятся механические характеристики:



Построение электромеханических характеристик асинхронного двигателя

Для построения электромеханических характеристик найдём ток ротора.

1. Для естественной характеристики:

$$I_2 = \sqrt{\frac{M \omega_1 s}{3R_2}},$$

где *синхронная угловая скорость* двигателя

$$\omega_1 = \frac{\pi n_1}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ рад/с},$$

активное сопротивление ротора

$$R_2 = \frac{U_{2H} s_H}{1,73 I_{2H}} = \frac{180 \cdot 0,03}{1,73 \cdot 160} = 0,02 \text{ Ом}.$$

2. Для искусственных характеристик:

$$I_{2H(1,2)} = \sqrt{\frac{M_{и(1,2)} \omega_1 s}{3(R_2 + R_{д(1,2)})}},$$

где первое добавочное сопротивление ротора

$$R_{д1} = R_2 \left(\frac{s_{кИ1}}{s_K} - 1 \right) = 0,02 \left(\frac{0,5}{0,144} - 1 \right) = 0,05 \text{ Ом},$$

второе добавочное сопротивление ротора

$$R_{д2} = R_2 \left(\frac{s_{кИ2}}{s_K} - 1 \right) = 0,02 \left(\frac{0,7}{0,144} - 1 \right) = 0,08 \text{ Ом}.$$

3. Задаваясь скольжением s и соответствующими моментами $M, M_{и1}, M_{и2}$ из таблицы 1, заполним таблицу 2, которую будем использовать для построения естественной и искусственных электромеханических характеристик асинхронного двигателя.

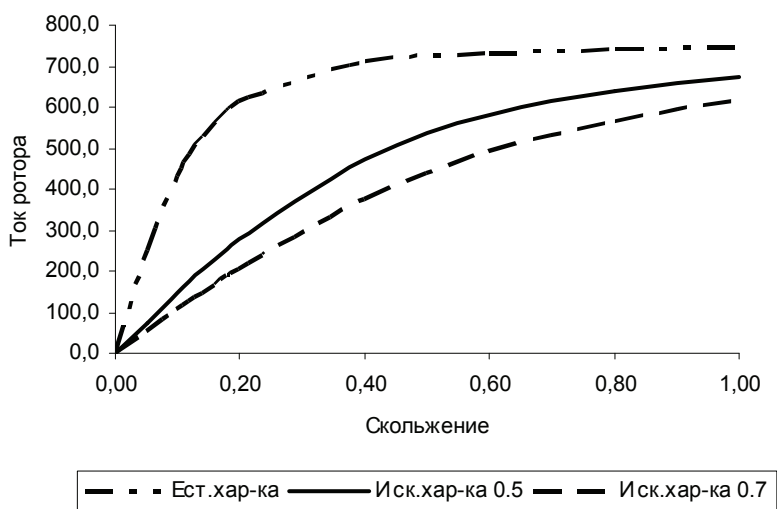
Таблица 2

Электромеханические характеристики

s	n_2 , об/мин	M , Нм	I_2 , А	$M_{и1}$, Нм	$I_{2и1}$, А	$M_{и2}$, Нм	$I_{2и2}$, А
0,0	1000	0	0	0	0	0	0
0,05	950	687	248	219	75	157	54
0,1	900	1038	431	426	148	310	107
0,12	880	1090	484	503	176	369	128
0,14	860	1107	527	575	203	426	148
0,16	840	1101	561	643	230	481	168
0,18	820	1080	590	706	256	534	188
0,2	800	1050	613	764	280	585	207
0,4	600	705	710	1081	471	954	374
0,6	400	502	734	1089	580	1095	491
0,8	200	386	743	996	640	1098	568
1	0	312	747	886	675	1041	618

4. По результатам таблицы 2 строятся электромеханические характеристики:

Электромеханические характеристики асинхронного двигателя



ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

№ Вар	Тип двигателя	P_n , кВт	n_1 , об/мин	$U_{2н}$, В	$I_{2н}$, А	λ	s_n , %
1	4AK160S4Y3	11	1500	305	22	3	5
2	4AK160M4Y3	14	1500	300	29	3,5	4
3	4AK180M4Y3	18	1500	295	38	4	3,5
4	4AK200M4Y3	22	1500	340	45	4	2,5
5	4AK200L4Y3	30	1500	350	55	4	2,5
6	4AK225M4Y3	37	1500	160	160	3	3,5
7	4AK250SA4Y3	45	1500	230	170	3	3
8	4AK250SB4Y3	55	1500	200	170	3	3
9	4AK250M4Y3	71	1500	250	170	3	2,5
10	4AK160S6Y3	7,5	1000	300	18	3,5	5
11	4AK160M6Y3	10	1000	310	20	3,8	4,5
12	4AK180M6Y3	13	1000	325	25	4	4,5
13	4AK200M6Y3	18,5	1000	360	35	3,5	3,5
14	4AK200L6Y3	22	1000	330	54	3,5	3,5
15	4AK225M6Y3	30	1000	140	150	2,5	3,5
16	4AK250S6Y3	37	1000	150	165	2,5	3,5
17	4AK250M6Y3	45	1000	180	160	2,5	3
18	4AK160S8Y3	5,5	750	300	14	2,5	6,5
19	4AK160M8Y3	7,5	750	290	16	3	6
20	4AK180M8Y3	11	750	270	25	3,5	4
21	4AK200M8Y3	15	750	360	28	3	3,5
22	4AK200L8Y3	18,5	750	300	40	3	3,5
23	4AK225M8Y3	22	750	102	140	2,2	4,5
24	4AK250S8Y3	30	750	125	155	2,2	4
25	4AK250M8Y3	37	750	148	155	2,2	3,5
26	4АНК160S4Y3	14	1500	330	27	3	5
27	4АНК160M4Y3	17	1500	315	34	3,5	5
28	4АНК180S4Y3	22	1500	300	43	3,2	5,5
29	4АНК180M4Y3	30	1500	290	63	3,2	4,5
30	4АНК200M4Y3	37	1500	360	62	3	3
31	4АНК200L4Y3	45	1500	375	75	3	3,5
32	4АНК225M4Y3	55	1500	170	200	2,5	4
33	4АНК250SA4Y3	75	1500	180	250	2,3	4,5

№ Вар	Тип двигателя	P_n , кВт	n_1 , об/мин	U_{2H} ,В	I_{2H} ,А	λ	s_H , %
34	4АНК250SB4Y3	90	1500	220	260	2,5	4
35	4АНК250M4Y3	110	1500	250	260	2,5	3,5
36	4АНК280S4Y3	132	1500	251	330	2	2,9
37	4АНК280M4Y3	160	1500	300	330	2	2,6
38	4АНК315S4Y3	200	1500	312	396	2	2,5
39	4АНК315M4Y3	250	1500	360	425	2	2,5
40	4АНК355S4Y3	315	1500	420	460	2	2,2
41	4АНК355M4Y3	400	1500	505	485	2	2
42	4АНК180S6Y3	13	1000	205	42	3	7
43	4АНК180M6Y3	17	1000	335	32,5	3	6
44	4АНК200M6Y3	22	1000	380	37	3	3,5
45	4АНК200L6Y3	30	1000	375	46	3	4
46	4АНК225M6Y3	37	1000	140	180	1,9	4
47	4АНК250SA6Y3	45	1000	155	200	2,3	4
48	4АНК250SB6Y3	55	1000	190	185	2,5	3,5
49	4АНК250M6Y3	75	1000	250	200	2,5	3
50	4АНК280S6Y3	90	1000	202	277	1,9	3,6
51	4АНК280M6Y3	110	1000	230	297	1,9	3,6
52	4АНК315S6Y3	132	1000	257	320	1,9	3
53	4АНК315M6Y3	160	1000	291	352	1,9	3
54	4АНК355S6Y3	200	1000	304	411	1,8	2,5
55	4АНК355M6Y3	250	1000	380	401	1,8	2,5
56	4АНК180S8Y3	11	750	315	22,5	3,2	5
57	4АНК180M8Y3	14	750	310	28	3,5	4,5
58	4АНК200M8Y3	18,5	750	380	30	2,5	4,5
59	4АНК200L8Y3	22	750	330	40	2,5	4,5
60	4АНК225M8Y3	30	750	120	165	1,8	5
61	4АНК250SA8Y3	37	750	115	190	2,2	5,5
62	4АНК250SB8Y3	45	750	140	190	2,2	4
63	4АНК250M8Y3	55	750	190	185	2,2	3,5
64	4АНК280S8Y3	75	750	190	257	1,9	4
65	4АНК280M8Y3	90	750	214	267	1,9	4
66	4АНК315S8Y3	110	750	225	311	1,9	3,5
67	4АНК315M8Y3	132	750	247	364	1,9	3,5
68	4АНК355S8Y3	160	750	285	353	1,7	2,7

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов И.И., Соловьев Г.И., Фролов В.Я. Электротехника и основы электроники. Учебник. 7-изд., перераб. и доп. СПб.: Издательство «Лань», 2012. – 736 с.: ил.
2. А.С. Касаткин, М.В. Немцов. Электротехника: учеб. для вузов М: Издательский центр «Академия» , 2008 - 544 с.
3. Иванов И. И., Соловьев Г.И., Фролов В.Я. Электротехника и основы электроники. Учебник. 7-изд., перераб. и доп. СПб.: Издательство «Лань», 2012. – 736 с.: ил.
http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=3190
4. Белов Н.В., Волков Ю.С. Электротехника и основы электроники. Учебное пособие. 1-изд., Издательство «Лань», 2012. – 432 с.:
http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=355.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	...3
ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	...4
Конструкция асинхронного двигателя	...4
Принцип работы. Основные уравнения	...6
Энергетика асинхронного двигателя	...11
Электромагнитный момент асинхронного двигателя	...12
Анализ характеристик асинхронного двигателя	...15
Пуск асинхронного двигателя	...18
Регулирование частоты вращения	...20
ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ	...24
ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ	...29
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	...31