

Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

Научно-исследовательский комплекс «Фундаментальные науки»  
Кафедра «Электротехника и промышленная электроника»

Соловьев В.А.

**РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Методические указания к самостоятельной работе студентов  
по дисциплине «Электротехника и электроника»,  
«Основы электропривода», раздел «Асинхронные машины»

Москва

(С) 2014 Copyright МГТУ им. Н.Э. Баумана

**Соловьев В.А.**

Расчет характеристик трехфазного асинхронного двигателя: методические указания к самостоятельной работе студентов по дисциплинам «Электротехника и электроника», «Основы электропривода» / В.А. Соловьев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 44 с. : ил.

Методические указания предназначены для самостоятельной работы студентов при выполнении ими домашнего задания по разделу «Асинхронные машины» дисциплин «Электротехника и электроника», «Основы электропривода» и соответствует учебным программам ФГОС третьего поколения направлений подготовки бакалавров и специалистов всех специальностей факультетов Э, МТ, СМ, РК и АК МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В методических указаниях изложены основные теоретические положения и методики расчета естественных и искусственных механических характеристик трехфазного асинхронного двигателя, его рабочих характеристик, а также методика анализа и обоснования целесообразности применения энергосберегающего регулятора напряжения питания асинхронного двигателя при продолжительном режиме работы по условиям эксплуатации с малой нагрузкой. Представлен пример расчета заданных характеристик трехфазного асинхронного двигателя при помощи математической системы Mathcad.

Рекомендовано Учебно-методической комиссией факультета ФН МГТУ им. Н.Э. Баумана.

## ВВЕДЕНИЕ

В промышленности самыми распространенными электродвигателями являются трехфазные асинхронные двигатели. Это самые простые по конструкции, дешевые и надежные электродвигатели.

Электродвигатели преобразуют электрическую энергию в механическую энергию, используемую для приведения в движение рабочие органы машин и управления их движением. Поэтому одной из важных характеристик асинхронного двигателя является механическая характеристика. Она позволяет сравнить и согласовать механические свойства двигателя и рабочего механизма. Основные свойства асинхронного двигателя, работающего под нагрузкой, определяются также рабочими характеристиками, отражающими зависимость изменения его энергетических показателей от нагрузки на валу. Возможности регулирования частоты вращения асинхронного двигателя показывают его искусственные механические характеристики, получаемые при изменении его параметров и параметров источника питания.

Электродвигателями потребляется более половины производимой в мире электроэнергии. Из них почти 80%, в большей части асинхронные двигатели, эксплуатируются в составе нерегулируемых электроприводов и загружены в среднем на 50%. При таких условиях работы энергетические показатели электродвигателей значительно ниже номинальных, что приводит к непроизводительному расходу электроэнергии. Применение регулируемого электропривода позволяет улучшить не только качественные показатели производственного оборудования, но и повысить эффективность использования потребляемой асинхронными двигателями энергии, достигаемой в результате увеличения, т.е. коррекции, их коэффициента мощности.

Для реализации возможностей регулирования частоты вращения

асинхронных двигателей и экономии потребляемой ими электроэнергии необходимо уметь рассчитывать и анализировать их основные характеристики и энергетические показатели. Методика их расчета, рекомендованная ГОСТ, основывается на использовании параметров эквивалентной электрической схемы замещения асинхронного двигателя и применяется в выполняемом домашнем задании.

**Цель выполнения домашнего задания** – ознакомление с методиками расчета по электрической схеме замещения асинхронного двигателя его естественных механической и рабочих характеристик, искусственных механических характеристик при изменении параметров электродвигателя и источника электропитания, а также обоснования технической целесообразности применения энергосберегающего регулятора напряжения питания асинхронного двигателя при его длительной работе по условиям эксплуатации с малой нагрузкой.

### **Порядок выполнения и оформления домашнего задания**

Домашнее задание по дисциплинам «Электротехника и электроника», «Основы электропривода» представляет расчетно-графическую работу, способствующую закреплению теоретических знаний и практических навыков, полученных при изучении учебников и выполнении лабораторных работ.

Для успешного выполнения домашнего задания необходимо:

1. Изучить соответствующие разделы учебников и учебных пособий.
2. Изучить методические указания к выполнению домашнего задания.
3. Разобрать типовые примеры, приведенные в учебниках и методическом пособии по теме домашнего задания.

Домашние задания выполняются индивидуально каждым студентом.

Номер варианта домашнего задания соответствует номеру фамилии студента по списку в групповом журнале.

Домашнее задание выполняется на листах формата А4 на одной стороне листа. Титульный лист оформляется в соответствии с общепринятой формой. Исходные данные приводятся на первой странице расчёта. Расчёт сопровождается пояснительными надписями.

Все схемы, графики и диаграммы вычерчиваются аккуратно, по линейке, в выбранном для каждой физической величины в соответствии с ГОСТ масштабе. Допускается применение для этой цели компьютерной графики.

При оформлении домашнего задания приводятся все необходимые формулы, а также расчеты с подстановкой данных. При расчёте механических и рабочих характеристик электродвигателей полученные результаты могут быть представлены в виде таблиц с подстановкой данных в формулы при вычислении только характерных режимов.

Выполненное домашнее задание сдается в установленный срок преподавателю на проверку. После проверки и получения подписи преподавателя о допуске к защите студент защищает домашнее задание. При его защите студенту задаются вопросы, требующие знания методики проводимых расчетов и умения проведения анализа полученных результатов.

### **Содержание и данные для выполнения домашнего задания**

Домашнее задание представляет собой расчёт естественной и искусственных механических характеристик и рабочих характеристик трёхфазного асинхронного двигателя серии 4А. При выполнении его необходимо:

1. Начертить Г-образную схему замещения асинхронного двигателя.
2. Рассчитать и построить естественные механические характеристики асинхронного двигателя  $M = f(s)$  и  $n_2 = f(M)$ .

3. Рассчитать и построить искусственные механические характеристики асинхронного двигателя  $n_2 = f(M)$  при изменении:

- 1) напряжения питания  $U_1$ ,
- 2) активного сопротивления обмотки ротора  $R_2'$ ,
- 3) частоты  $f_1$  и напряжения питания  $U_1$  по закону  $U_1 / f_1 = \text{const}$ .

4. Для естественного режима работы рассчитать и построить рабочие характеристики асинхронного двигателя  $M, n_2, I_1, \cos\varphi, P_1, \eta = f(P_2)$ .

5. Для заданного момента нагрузки  $M_c$  асинхронного двигателя определить его основные энергетические показатели  $I_1, \cos\varphi, P_1, P_2, \eta$  и потребляемый из сети ток  $I$  при номинальном и пониженном напряжении питания. Рассчитать пусковые токи асинхронного двигателя  $I_{\text{п}}$  при номинальном и пониженном напряжении питания. Сделать выводы о целесообразности регулирования напряжения питания электродвигателя.

Исходными для расчёта характеристик асинхронного двигателя являются приведённые в табл.1 – 4 данные:

а) тип и паспортные данные электродвигателя:

$U_{1\text{н}}$  – номинальное фазное напряжение, В;

$f_{1\text{н}}$  – номинальная частота сети, Гц;

$P_{2\text{н}}$  – номинальная мощность, кВт;

$n_{2\text{н}}$  – номинальная частота вращения, мин<sup>-1</sup>;

$\eta_{\text{н}}$  – коэффициент полезного действия электродвигателя в номинальном режиме, %;

$\cos\varphi_{\text{н}}$  – коэффициент мощности электродвигателя в номинальном режиме;

б) параметры схемы замещения:

$R_x, X_x$  – активное и индуктивное сопротивления цепи намагничивания электродвигателя, Ом;

$R_1, X_1$  – активное и индуктивное сопротивления фазной обмотки статора, Ом;

$R_2', X_2'$  – приведённые к обмотке статора активное и индуктивное сопротивления фазной обмотки ротора, Ом;

в) коэффициенты, задающие степень изменения параметров источника электропитания и электродвигателя (сообщаются преподавателем):

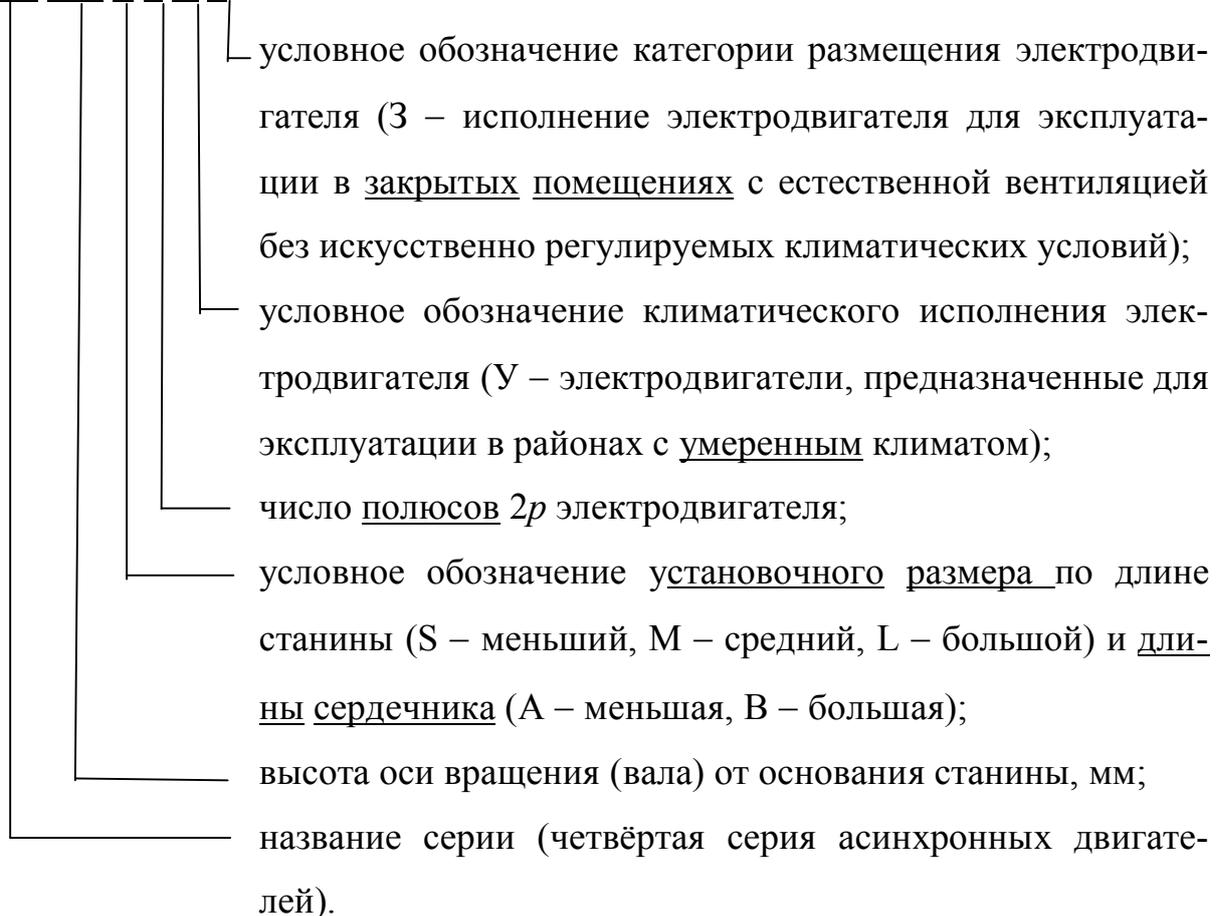
$k_U = U_1 / U_{1н}$  – коэффициент относительного изменения напряжения питания электродвигателя;

$k_{R2} = R_{2и}' / R_2'$  – коэффициент относительного изменения приведённого активного сопротивления фазной обмотки ротора;

$k_f = f_1 / f_{1н}$  – коэффициент относительного изменения частоты напряжения питания.

Дополнительную информацию об электродвигателе можно получить из его условного обозначения, структура которого поясняется на примере асинхронного двигателя 4А160S4УЗ.

4А 160 S 4 У З



## Основные теоретические положения и методические указания к выполнению домашнего задания

### 1. Устройство и схема замещения асинхронного двигателя

Трехфазный асинхронный двигатель состоит из двух основных частей: неподвижного статора и вращающегося ротора.

Статор (рис.1) представляет собой помещенный внутри в стального или алюминиевого корпуса 1 полый цилиндр 2, собранный из кольцеобразных изолированных пластин электротехнической стали. На его внутренней стороне имеются пазы, в которых размещаются симметрично три фазные обмотки 3, состоящие из одной или нескольких катушек медного изолированного провода. Фазные обмотки соединяются звездой или треугольником и подключаются к трехфазной сети. Схема соединения фазных обмоток зависит от линейных напряжений трехфазной сети, указанных на клеммной коробке электродвигателя, например, 220/380 В. При меньшем напряжении 220 В фазные обмотки соединяются треугольником, а при большем напряжении 380 В звездой, что обеспечивает при каждом способе соединения фазное напряжение обмоток 220 В.

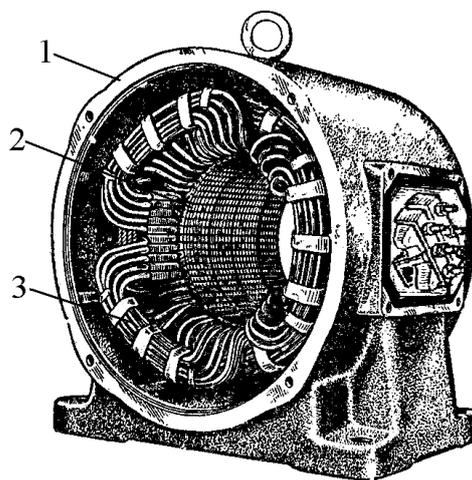


Рис.1

Ротор асинхронного двигателя представляет собой закрепленный на валу цилиндр, собранный из изолированных пластин электротехнической стали, на внешней стороне которого имеются пазы. В пазах расположена его обмотка, которая может быть *короткозамкнутой* и *фазной*. Соответст-

венно различают асинхронный двигатель с короткозамкнутым и фазным ротором.

Обмотка короткозамкнутого ротора (рис.2) выполняется в виде круглой («беличьей») клетки, образованной расположенными в пазах ротора медными или алюминиевыми стержнями 1, замкнутыми накоротко с двух сторон кольцами 2 из того же материала.

Фазная обмотка ротора (рис.3) выполняется так же, как и обмотка статора, изолированным медным проводом. Ее катушки соединяются звездой, а их свободные концы присоединяются к трем контактными кольцам 1, находящимся на валу ротора. Кольца изолированы друг от друга и от вала. К контактным кольцам прижаты графитовые щетки 2, при помощи которых к обмотке ротора подключается трехфазный реостат 3. Его включение в цепь обмотки ротора позволяет регулировать частоту вращения асинхронного двигателя, а также существенно улучшить его пусковые свойства, т.е. уменьшить пусковой ток и одновременно увеличить пусковой момент.

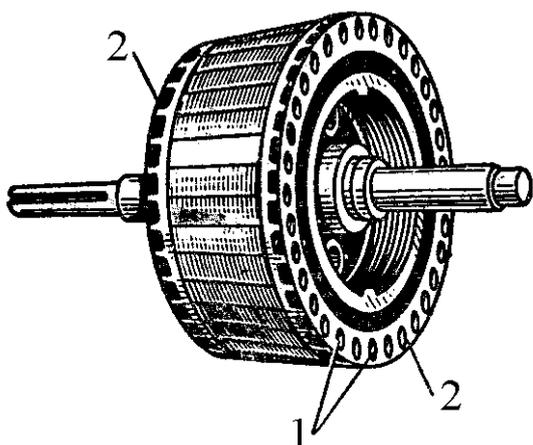


Рис.2

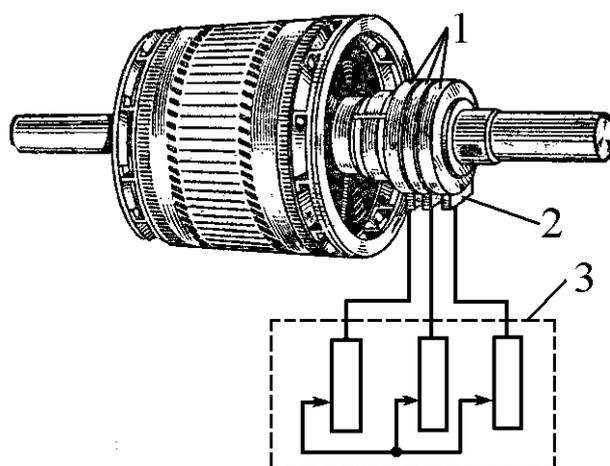


Рис.3

Ротор асинхронного двигателя помещается внутри статора и фиксируется в этом положении при помощи боковых подшипниковых щитов.

Для анализа характеристик асинхронного двигателя в установившихся режимах пользуются его электрической схемой замещения. На рис.4 изображена Г - образная схема замещения асинхронного двигателя. Она представляет собой составленную из идеализированных элементов электрическую схему замещения одной фазы электродвигателя, в которой магнитная связь между статором и ротором заменена электрической.

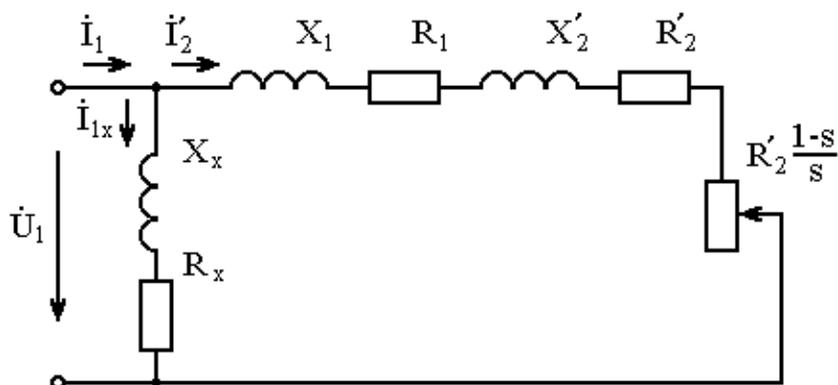


Рис.4

По аналогии со схемой замещения трансформатора в ней переменный резистор  $R_2'(1 - s)/s$  представляет эквивалент полезной нагрузки. Поэтому мощность, выделяемая в нём, будет равна одной трети механической мощности  $P_{\text{мех}}$ , развиваемой асинхронным двигателем. По схеме замещения можно определить мощность потерь в стали  $\Delta P_{\text{ст}}$ , мощности потерь в обмотках статора  $\Delta P_{\text{с1}}$  и ротора  $\Delta P_{\text{с2}}$ , а также потребляемую асинхронным двигателем мощность  $P_1$ .

## 2. Естественные механические характеристики асинхронного двигателя

Механической характеристикой асинхронного двигателя называется зависимость развиваемого им момента от скольжения  $M = f(s)$  и зависи-

мость частоты вращения ротора от развиваемого момента  $n_2 = f(M)$ . Механическая характеристика двигателя, полученная при номинальных (паспортных) напряжении и частоте сети при основной схеме включения его обмоток без включенных в их цепи дополнительных электротехнических элементов, является *естественной*. Если указанные условия не соблюдаются, то механическая характеристика будет *искусственной*.

Расчёт естественной механической характеристики асинхронного двигателя выполняется по формуле, представляющей собой аналитическую зависимость его электромагнитного момента от скольжения

$$M = \frac{3U_{1H}^2 p R_2'}{2\pi f_{1H} s \left[ \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]},$$

где  $p$  - число пар полюсов обмотки статора.

Механическая характеристика асинхронного двигателя нелинейная, поэтому при выполнении этого пункта задания рекомендуется задаться значениями скольжения  $s = 0; 0,5s_H; s_H; 1,5s_H; s_K; 0,6; 0,8; 1,0$  и определить соответствующий им электромагнитный момент.

Скольжению  $s = 0$  соответствует режим идеального холостого хода электродвигателя, при работе в котором его частота вращения равна частоте вращения магнитного поля, т.е. синхронной частоте вращения

$$n_1 = \frac{60 f_{1H}}{p}, \text{ мин}^{-1},$$

а электромагнитный момент равен  $M = 0$ .

Скольжение асинхронного двигателя рассчитывается по формуле

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

При расчёте номинального скольжения электродвигателя в ней принимается  $n_2 = n_{2H}$ . Критическое скольжение, при котором асинхронный

двигатель развивает максимальный момент  $M_K$ , зависит от параметров его обмоток:

$$s_K = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}.$$

Значению  $s = 1$  соответствует пусковой режим электродвигателя, при котором его частота вращения равна  $n_2 = 0$ , а развиваемый электромагнитный момент называется пусковым моментом  $M_{\Pi}$ . Построение механической характеристики  $n_2 = f(M)$  производится по данным, полученным при расчёте зависимости  $M = f(s)$  с помощью следующего соотношения:

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

Примерный вид естественных механических характеристик асинхронного двигателя с указанием характерных точек показан на рис.5, 6. При оформлении домашнего задания они строятся совместно с искусственными механическими характеристиками.

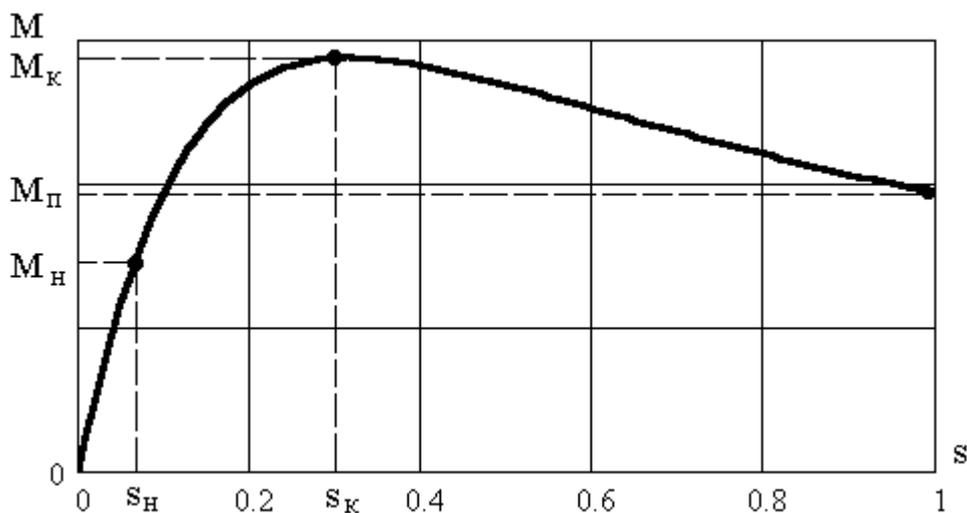


Рис.5

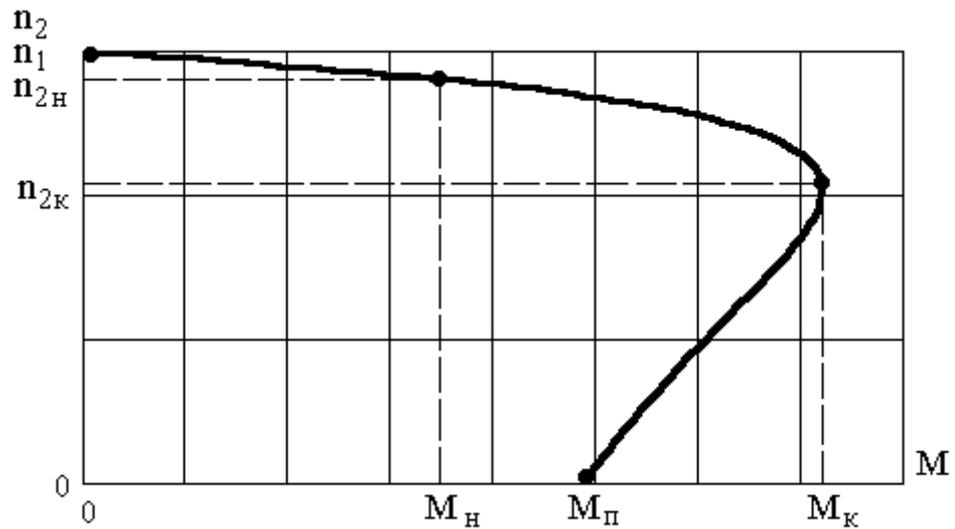


Рис.6

### 3. Искусственные механические характеристики асинхронного двигателя

Особенности расчёта искусственных механических характеристик асинхронного двигателя состоят в следующем.

3.1. При изменении напряжения питания критическое скольжение и соответствующая ему частота вращения асинхронного двигателя остаются такими же, как при его работе в естественном режиме. Электромагнитный момент асинхронного двигателя, как следует из его математического выражения, прямо пропорционален напряжению питания во второй степени. Поэтому его значения  $M_{и}$  для построения искусственной механической характеристики можно определить по результатам расчёта естественной механической характеристики п.2 задания, используя следующее соотношение

$$M_{и} = \left( \frac{U_1}{U_{1н}} \right)^2 M = k_U^2 M .$$

Механические характеристики при изменении напряжения питания асинхронного двигателя изображены на рис.7, 8.

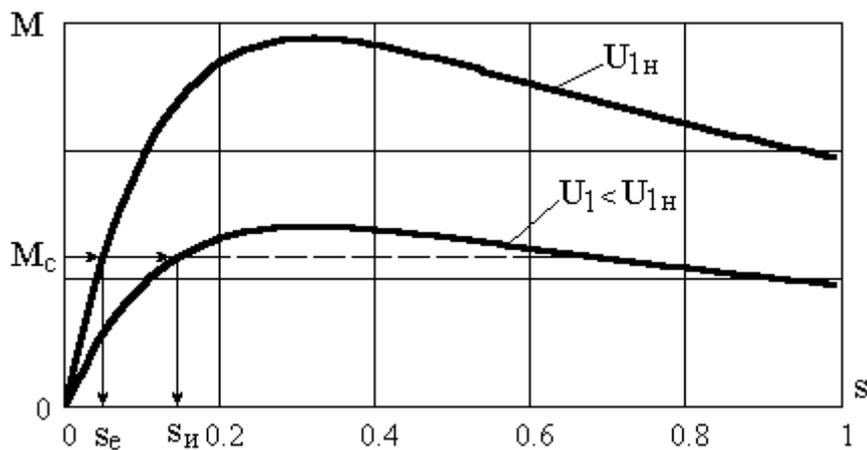


Рис.7

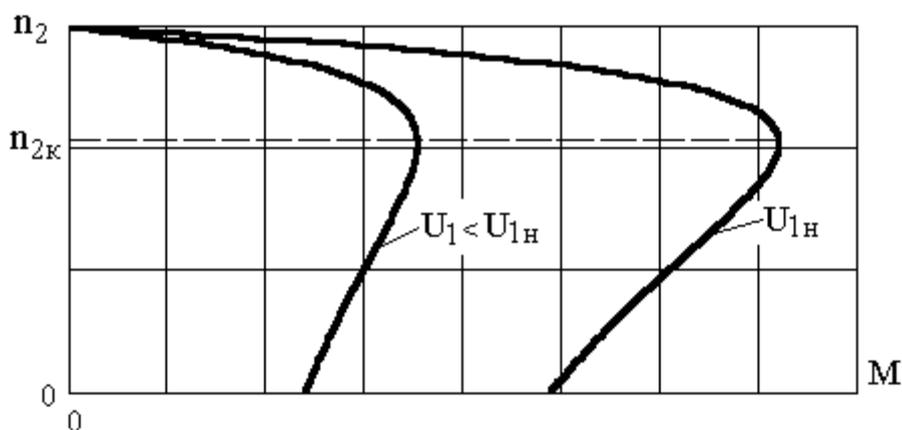


Рис.8

3.2. Увеличение активного сопротивления фазной обмотки ротора асинхронного двигателя до  $R_{2и}' = k_{R2}R_2'$  приводит к пропорциональному возрастанию критического скольжения:

$$s_{ки} = \frac{R_{2и}'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

Электромагнитный момент двигателя при измененном активном сопротивлении обмотки ротора рассчитывается по формуле:

$$M_{и} = \frac{3U_{1н}^2 p R'_{2и}}{2\pi f_{1н} s \left[ \left( R_1 + \frac{R'_{2и}}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]}$$

При расчёте этой искусственной механической характеристики рекомендуется задаться значениями скольжения  $s = 0; s_{н}; 4s_{н}; s_{ки}; 0,6; 0,8; 1,0$ . Влияние активного сопротивления фазных обмоток ротора на механическую характеристику асинхронного двигателя показано на рис.9.

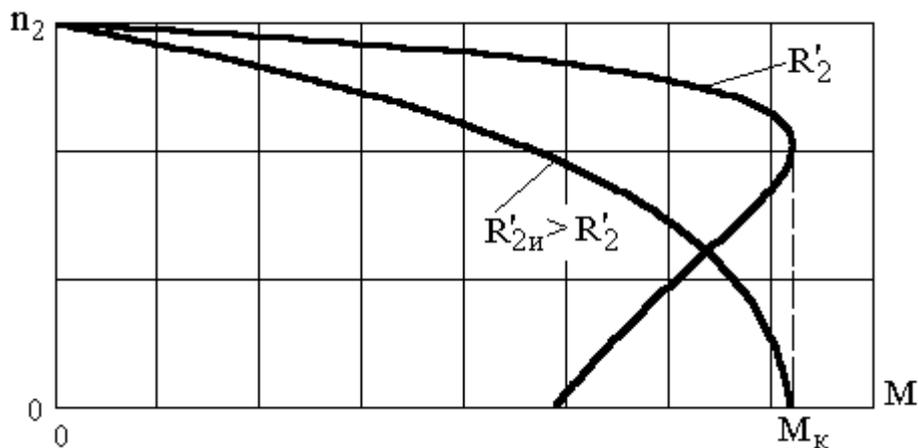


Рис.9

3.3. При регулировании частоты вращения асинхронного двигателя изменением частоты напряжения питания по закону  $U_1 / f_1 = const$  его критическое скольжение находится из следующего выражения:

$$s_{ки} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + k_f^2 (X_1 + X'_2)^2}},$$

т.е. с уменьшением частоты питающего напряжения критическое скольжение возрастает, а с увеличением частоты уменьшается.

Расчёт электромагнитного момента двигателя производится с учётом того, что при рассматриваемом способе его регулирования

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1н} k_U}{f_{1н} k_f} = \frac{U_{1н}}{f_{1н}} = const,$$

т.е.  $k_U = k_f$ . На основании этого выражение для электромагнитного момента асинхронного двигателя принимает следующий вид:

$$M_{и} = \frac{3U_{1н}^2 p R_2' k_f}{2\pi f_{1н} s \left[ \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + k_f^2 (X_1 + X_2')^2 \right]}.$$

При расчёте этой искусственной механической характеристики электродвигателя рекомендуется задаться значениями скольжения  $s = 0; s_{н}; 1,5s_{н}; s_{кн}; 0,6; 0,8; 1,0$ . Частота вращения магнитного поля в двигателе зависит от частоты напряжения питания и будет равна

$$n_{1и} = \frac{60 f_{1н} k_f}{p},$$

а частота вращения его ротора

$$n_{2и} = n_{1и} (1 - s).$$

Механические характеристики асинхронного двигателя при рассматриваемом способе регулирования его частоты вращения изображены на рис.10.

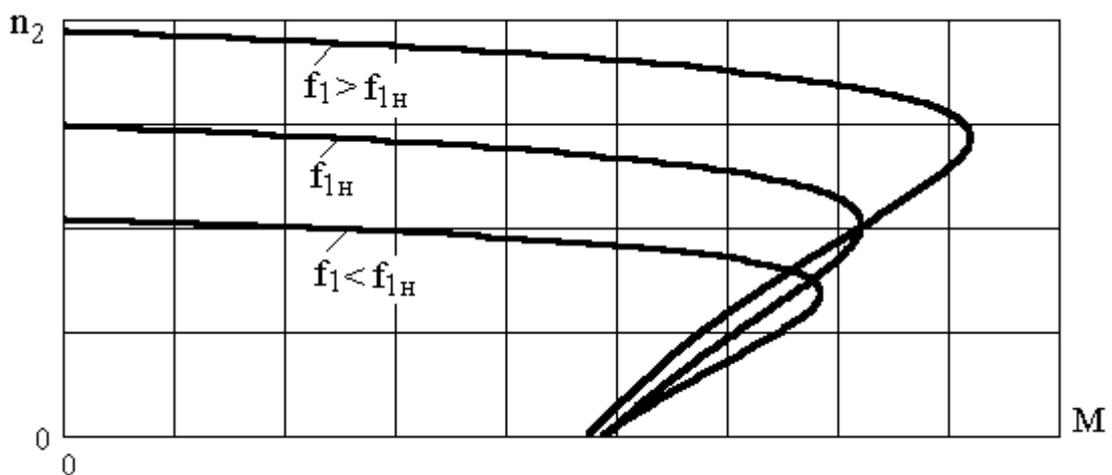


Рис.10

#### 4. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

*Рабочими характеристиками* асинхронного двигателя называются графические изображения зависимостей  $n_2$ ,  $M$ ,  $I_1$ ,  $\cos\varphi$ ,  $P_1$ ,  $\eta = f(P_2)$  при  $U_1 = const$  и  $f_1 = const$ . При  $U_1 = U_{1н}$  и  $f_1 = f_{1н}$  эти характеристики являются *естественными*.

Расчёт естественных рабочих характеристик асинхронного двигателя рекомендуется выполнить для значений скольжения  $s = s_x$ ;  $0,5s_n$ ;  $s_n$ ;  $1,5s_n$ . При этом следует учесть, что соответствующие этим скольжениям значения электромагнитного момента  $M$  и частоты вращения  $n_2$  асинхронного двигателя, кроме значений этих параметров при его холостом ходе с  $s = s_x$ , были рассчитаны ранее, в п.2 задания. Для определения значений других величин, входящих в состав рабочих характеристик двигателя, необходимо воспользоваться его Г-образной схемой замещения, изображённой на рис.4. На основании первого закона Кирхгофа для этой схемы

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{1x} + \dot{I}'_2.$$

Токи в параллельных ветвях схемы замещения асинхронного двигателя рассчитываются по формулам:

$$\dot{I}_{1x} = \frac{\dot{U}_1}{R_x + jX_x} = I_{1xa} - jI_{1xp},$$
$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{U}_1}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right) + j(X_1 + X'_2)} = I'_{2a} - jI'_{2p},$$

где  $I_{1xa}$ ,  $I_{1xp}$  – активная и реактивная составляющие тока намагничивания, т.е. тока идеального холостого хода электродвигателя;  $I'_{2a}$ ,  $I'_{2p}$  – приведённые к обмотке статора активная и реактивная составляющие тока обмотки ротора электродвигателя.

В итоге фазный ток асинхронного двигателя будет равен

$$\dot{I}_1 = (I_{1xa} + I'_{2a}) - j(I_{1xp} + I'_{2p}) = I_{1a} + jI_{1p},$$

а его действующее значение

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}.$$

Коэффициент мощности асинхронного двигателя может быть определён по формуле

$$\cos \varphi = \frac{I_{1a}}{I_1}.$$

Правомерность применения этой формулы для расчёта  $\cos \varphi$  асинхронного двигателя поясняет векторная диаграмма фазных напряжения и тока на рис.11.

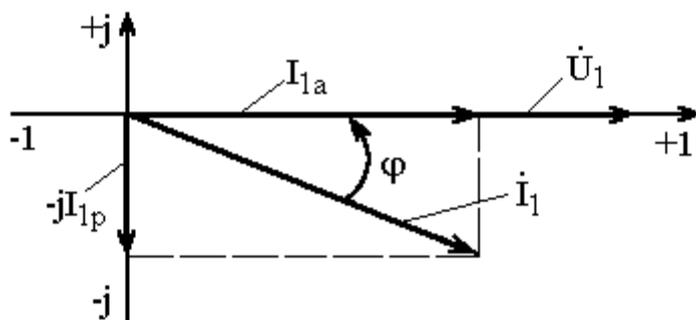


Рис.11

Потребляемая двигателем из сети мощность рассчитывается по формуле

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi,$$

а развиваемая им механическая мощность на основании схемы замещения будет равна

$$P_{\text{мех}} = 3(I'_2)^2 R'_2 \frac{1-s}{s},$$

$$\text{где } (I_2')^2 = (I_{2a}')^2 + (I_{2p}')^2.$$

Для расчёта коэффициента полезного действия (КПД) двигателя используется выражение:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1},$$

где  $P_2$  – полезная механическая мощность на валу двигателя;  $\Delta P$  – мощность потерь в двигателе.

Потери мощности  $\Delta P$ , возникающие в асинхронном двигателе при преобразовании электрической энергии в механическую, рассеиваются в нем и вызывают его нагрев. Они состоят из двух составляющих:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{пер}} + \Delta P_{\text{пост}},$$

где  $\Delta P_{\text{пер}}$  – переменные потери мощности в двигателе;  $\Delta P_{\text{пост}}$  – постоянные потери мощности в двигателе.

Переменные потери мощности зависят от нагрузки двигателя, т.е. от тока двигателя. В них входят мощность потерь в обмотке статора  $\Delta P_{\text{э1}}$ , мощность потерь в обмотке ротора  $\Delta P_{\text{э2}}$  и мощность добавочных потерь  $\Delta P_{\text{д}}$ :

$$\Delta P_{\text{пер}} = \Delta P_{\text{э1}} + \Delta P_{\text{э2}} + \Delta P_{\text{д}}.$$

Из схемы замещения асинхронного двигателя (рис.4) следует:

$$\Delta P_{\text{э1}} = 3R_1 (I_2')^2,$$

$$\Delta P_{\text{э2}} = 3R_2' (I_2')^2.$$

Добавочные потери мощности  $\Delta P_{\text{д}}$  возникают в обмотках двигателя и обусловлены зубчатостью статора и ротора, а также несинусоидальным распределением магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя. Эти потери мощности пропорциональны квадрату фазного тока двигателя и со-

ставляют 0,5 - 1 % от номинальной мощности потерь  $\Delta P_{\text{н}}$ , поэтому ими при расчете КПД асинхронного двигателя допустимо пренебречь.

К постоянным потерям мощности асинхронного двигателя, не изменяющимся от нагрузки, при  $U_1 = U_{1\text{н}}$  и  $f_1 = f_{1\text{н}}$  можно отнести мощность потерь в стали  $\Delta P_{\text{ст}}$  и мощность механических потерь  $\Delta P_{\text{мех}}$ . Общая мощность этого вида потерь будет равна

$$\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех}}.$$

Мощность  $\Delta P_{\text{ст}}$  определяется в основном потерями из-за гистерезиса и вихревых токов в сердечнике статора, так как подобные потери мощности в сердечнике ротора в связи с малой частотой тока обмотки ротора  $f_2 = 1 - 3$  Гц рабочем режиме асинхронного двигателя пренебрежимо малы. Тогда на основании схемы замещения (рис.4) асинхронного двигателя

$$\Delta P_{\text{ст}} = 3R_x I_{1x}^2.$$

Мощность механических потерь  $\Delta P_{\text{мех}}$  обусловлена силами трения в подшипниках, ротора о воздух и вентиляционными потерями. Она определяется при *номинальном режиме* работы асинхронного двигателя. Для этого по вышеприведенным формулам при  $U_1 = U_{1\text{н}}$  и  $s = s_{\text{н}}$  с использованием *параметров схемы замещения* асинхронного двигателя в следующей последовательности рассчитываются  $I_{1x}$ ,  $I_{2\text{н}}$ ,  $\Delta P_{\text{эл.н}}$ ,  $\Delta P_{\text{эл.н}}$  и  $\Delta P_{\text{ст}}$ . Затем по *паспортным данным* определяется *номинальная потребляемая мощность* асинхронного электродвигателя

$$P_{1\text{н}} = \frac{P_{2\text{н}}}{\eta_{\text{н}}}$$

и *номинальная мощность потерь*

$$\Delta P_{\text{н}} = P_{1\text{н}} - P_{2\text{н}},$$

где  $I_{2н}$ ,  $\Delta P_{\text{эл.н}}$ ,  $\Delta P_{\text{эл.н}}$  – номинальный приведённый ток обмотки ротора, номинальные мощности потерь в обмотках статора и ротора.

В результате мощность механических потерь будет равна

$$\Delta P_{\text{мех}} = \Delta P_{\text{н}} - (\Delta P_{\text{эл.н}} + \Delta P_{\text{эл.н}} + \Delta P_{\text{ст}}).$$

Полезная механическая мощность асинхронного двигателя  $P_2$  меньше развиваемой им механической мощности  $P_{\text{мех}}$  на величину мощности механических потерь

$$P_2 = P_{\text{мех}} - \Delta P_{\text{мех}}.$$

Механическим потерям мощности  $\Delta P_{\text{мех}}$  в двигателе соответствует приложенный к его валу момент трения

$$M_{\text{тр}} = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{\Delta P_{\text{мех}}}{n_{2н}}.$$

Для преодоления момента трения  $M_{\text{тр}}$  асинхронный двигатель должен развивать равный ему электромагнитный момент. Поэтому скольжение асинхронного двигателя при работе в режиме реального холостого хода  $s_x > 0$ . Значение скольжения  $s_x$ , принимая во внимание, что зависимость скольжения асинхронного двигателя от его электромагнитного момента при  $0 \leq M \leq M_{\text{н}}$  практически линейная, можно определить из соотношения

$$s_x = \frac{M_{\text{тр}}}{M_{\text{р}}} s_{\text{р}},$$

где  $s_{\text{р}}$ ,  $M_{\text{р}}$  – скольжение и соответствующий ему электромагнитный момента асинхронного двигателя в опорной (реперной) точке механической характеристики.

Выбор значения скольжения  $s_{\text{р}}$ , по которому рассчитывается момент  $M_{\text{р}}$ , осуществляется в диапазоне  $0,1s_{\text{н}} \leq s_{\text{р}} \leq 0,5s_{\text{н}}$ . При этом следует учесть, что с уменьшением значения  $s_{\text{р}}$  точность расчета  $s_x$  повышается.

По полученным данным строятся графики, отражающие зависимости изменения рассчитанных показателей асинхронного двигателя от развиваемой им мощности  $P_2$ . Их примерный вид показан на рис.12.

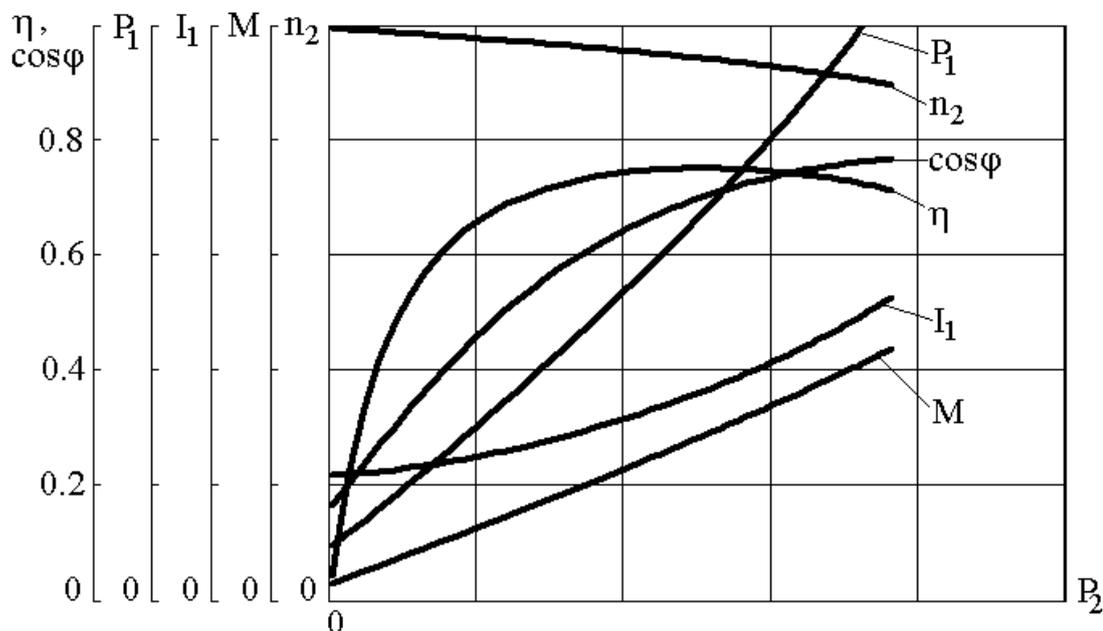


Рис.12

Из графиков рабочих характеристик асинхронного двигателя следует, что с увеличением нагрузки потребляемый им ток  $I_1$  возрастает. Увеличиваются также его коэффициент мощности  $\cos\varphi$  и КПД  $\eta$ . Эти показатели асинхронного двигателя имеют максимум, который у коэффициента мощности  $\cos\varphi$  достигается при  $P_2 \approx P_{2н}$ . Максимум КПД асинхронного двигателя, как и у трансформатора, при  $\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{пер}}$ . Это условие у асинхронных двигателей выполняется при нагрузках  $P_2 = (0,65-0,85) P_{2н}$ .

## 5. Обоснование применения энергосберегающего регулятора напряжения питания асинхронного двигателя

Анализ рабочих характеристик асинхронного двигателя (рис.12) показывает, что его коэффициент мощности  $\cos\varphi$  существенно зависит от нагрузки, причем в большей степени, чем КПД. При холостом ходе у асин-

хронных двигателей  $\cos\varphi < 0,2$  и остается невысоким при моменте нагрузки (сопротивления)  $M_c \leq 0,6 M_n$ . Это объясняется тем, что в режиме холостого хода потребляемый двигателем ток  $I_1 = I_{1x}$  состоит в основном из реактивной составляющей, затрачиваемой на создание в нем основного магнитного потока. По мере увеличения нагрузки на валу двигателя пропорционально растет активная составляющая потребляемого им тока  $I_1$ . Реактивная составляющая тока асинхронного двигателя при этом изменяется сравнительно мало, так как основной магнитный поток двигателя остается практически постоянным. Поэтому при нагружении асинхронного двигателя до  $M_c \approx M_n$  его  $\cos\varphi$  возрастает.

При нагрузке асинхронного двигателя, превышающей номинальную, из-за увеличения частоты тока в обмотке ротора  $f_{2s} = f_2 s$  заметно возрастает ее индуктивное сопротивление  $X_{2s}' = X_2' s$ . Относительная доля реактивной составляющей в токе двигателя увеличивается, и его  $\cos\varphi$  уменьшается.

Коэффициент мощности является важным энергетическим показателем асинхронного двигателя, характеризующим эффективность использования потребляемой им электроэнергии из сети. При одинаковой потребляемой мощности  $P_1$  асинхронный двигатель с меньшим  $\cos\varphi$  потребляет бóльшую реактивную мощность  $Q_1$ , загружая сеть бóльшим током и создавая в ней дополнительные потери мощности. Поэтому повышение  $\cos\varphi$  асинхронных двигателей, – одних из самых распространенных электродвигателей, – представляет собой важную технико-экономическую задачу.

Существует несколько способов повышения  $\cos\varphi$  асинхронных двигателей. К ним относятся замена малонагруженных двигателей подобными двигателями меньшей мощности, отключение, если допустимо по условиям работы производственного оборудования, двигателей от сети при продолжительной работе их на холостом ходу и понижение напряжения питания асинхронных двигателей, длительно работающих по условиям эксплуатации с малой нагрузкой.

Последний способ получил наибольшее распространение, так как его применение позволяет не только повысить  $\cos\varphi$  асинхронного двигателя, но и понизить его пусковой ток, что также уменьшает токовую нагрузку сети. Реализация этого способа повышения  $\cos\varphi$  асинхронных двигателей может осуществляться с помощью энергосберегающего регулятора напряжения на основе трехфазного автотрансформатора или полупроводникового регулятора переменного напряжения, а также, если  $M_c < 0,33M_n$ , переключением обмоток статора двигателя со схемы треугольника на звезду, которое приводит к снижению фазного напряжения на обмотках двигателя в  $\sqrt{3}$  раз. Необходимое напряжение питания асинхронного двигателя, при котором его  $\cos\varphi$  при  $M_c < M_n$  будет равен номинальному значению  $\cos\varphi_n$ , можно определить, воспользовавшись известной взаимосвязью его электромагнитного момента и напряжения питания. Оно должно быть равно

$$U_1 = U_{1н} \sqrt{\frac{M_c}{M_n}}.$$

При понижении напряжения питания асинхронного двигателя уменьшается его магнитный поток, а следовательно, и реактивная составляющая потребляемого тока. Но, поскольку момент нагрузки на валу двигателя не изменяется, одновременно возрастает активная составляющая тока обмотки ротора, и соответственно, мощности потерь в обмотках статора  $\Delta P_{\sigma 1}$  и ротора  $\Delta P_{\sigma 2}$ . При этом возможно некоторое снижение КПД двигателя.

Для обоснования технической целесообразности применения энергосберегающего регулятора напряжения питания асинхронного двигателя на необходимо выполнить сравнительный расчет его основных энергетических показателей  $I_1$ ,  $\cos\varphi$ ,  $P_1$ ,  $\eta$  и потребляемых из сети токов  $I$  при моменте нагрузки  $M_c < M_n$ , а также пусковых токов  $I_n$  для двух значений напряжения питания  $U_1 = U_{1н}$  и  $U_1 < U_{1н}$ .

Заданный для выполнения расчёта нагрузочный момент  $M_c = k_U^2 M_H$  определяется по известному из исходных данных коэффициенту  $k_U$  и рассчитанному в п.2 номинальному моменту  $M_H$ . Расчёт энергетических показателей асинхронного двигателя  $I_1$ ,  $\cos \varphi$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $\eta$  при  $U_1 = U_{1H}$  и  $U_1 = k_U U_{1H}$  выполняется по методике, изложенной в п.4 указаний к выполнению данного задания. Перед их расчётом необходимо предварительно для обоих напряжений питания определить скольжение электродвигателя с заданным моментом нагрузки  $M_c$ . Это можно сделать одним из двух способов – графическим и аналитическим, который выбирается самостоятельно.

Графический способ основывается на использовании для определения скольжения асинхронного двигателя графиков его механических характеристик  $M = f(s)$ , изображённых на рис.7. Для обеспечения необходимой точности определения скольжения при их построении изменению  $s$  от 0 до 1 должен соответствовать отрезок длиной не менее 100 мм. На графиках через точку, соответствующую  $M_c$ , проводится горизонтальная прямая линия. Проекции точек пересечения этой линии с рабочими участками естественной и искусственной механических характеристик асинхронного двигателя на горизонтальную ось системы координат являются соответственно значениями его скольжения  $s_e$  и  $s_H$  при естественном и искусственном режимах работы.

Для аналитического определения скольжения асинхронного двигателя используется формула его механической характеристики, в которую подставляется заданный момент нагрузки  $M_c$  и соответствующее напряжение питания  $U_1$ :

$$M_c = \frac{3U_1^2 p R_2'}{2\pi f_{1H} s \left[ \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]}.$$

Это выражение представляет собой квадратное уравнение относительно переменной  $s$ , которое после преобразований и упрощений принимает вид:

$$s^2 - \left( \frac{3U_1^2 p R_2'}{2\pi f_{1H} M_c R_1^2} - 2 \frac{R_2'}{R_1} \right) s + \left( \frac{R_2'}{R_1} \right)^2 = 0.$$

При решении этого уравнения получаются два положительных корня, меньшее значение из которых используется для расчёта энергетических показателей асинхронного двигателя при соответствующем напряжении питания  $U_1$ .

Расчёт пускового тока асинхронного двигателя  $I_{1п}$  выполняется также, как и фазного тока  $I_1$  при расчете его рабочих характеристик, но при этом скольжение принимается равным  $s = 1$ .

Потребляемый асинхронным двигателем из сети ток при  $U_1 = U_{1H}$  равен  $I = I_1$ , а пусковой ток  $I_{п} = I_{1п}$ . При питании асинхронного двигателя пониженным напряжением  $U_1 = k_U U_{1H}$  от энергосберегающего регулятора напряжения, например, на основе трехфазного автотрансформатора, при работе в тех же режимах потребляемые от сети токи соответственно будут равны  $I = k_U I_1$  и  $I_{п} = k_U I_{1п}$ .

Полученные при расчете данные сводятся в таблицу. По результатам их сопоставления, и в первую очередь коэффициента мощности потребляемого из сети тока, делается вывод о целесообразности применения энергосберегающего регулятора напряжения питания асинхронного двигателя.

## Пример расчета характеристик трехфазного асинхронного двигателя при помощи математической системы Mathcad

### 1. Исходные данные для расчета

Паспортные данные электродвигателя: типоразмер - 4AA63B4УЗ  $p := 2$

$U_{1H} := 220$   $f_{1H} := 50$   $P_{2H} := 370$   $n_{2H} := 1365$   $\eta_H := 0.68$   $\cos\phi_H := 0.69$

Параметры схемы замещения:  $R_x := 29.58$   $X_x := 272.75$

$R_1 := 31.30$   $X_1 := 15.83$   $R'_2 := 25.78$   $X'_2 := 33.14$

Коэффициенты, задающие степень изменения параметров электрической сети и электродвигателя:

$k_u := 0.7$   $k_{R2} := 2$   $k_f := 0.75$

### 2. Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя

$f_1 := f_{1H}$   $U_1 := U_{1H}$   $s := 0.0001, 0.01.. 1.0$

$n_1 := 60 \cdot \frac{f_1}{p}$   $n_2(s) := n_1 \cdot (1 - s)$   $s_H := \frac{(n_1 - n_{2H})}{n_1}$

$M(s) := \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot p \cdot R'_2}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot s \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]}$   $s_K := \frac{R'_2}{\sqrt{(R_1)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}$

Результаты расчета:  $n_1 = 1500$   $s_H = 0.09$   $s_K = 0.44$

$M(0.0001) = 0$   $n_2(0.0001) = 1499.85$

$M(0.5 \cdot s_H) = 1.44$   $n_2(0.5 \cdot s_H) = 1432.5$

$M(s_H) = 2.56$   $n_2(s_H) = 1365.00$

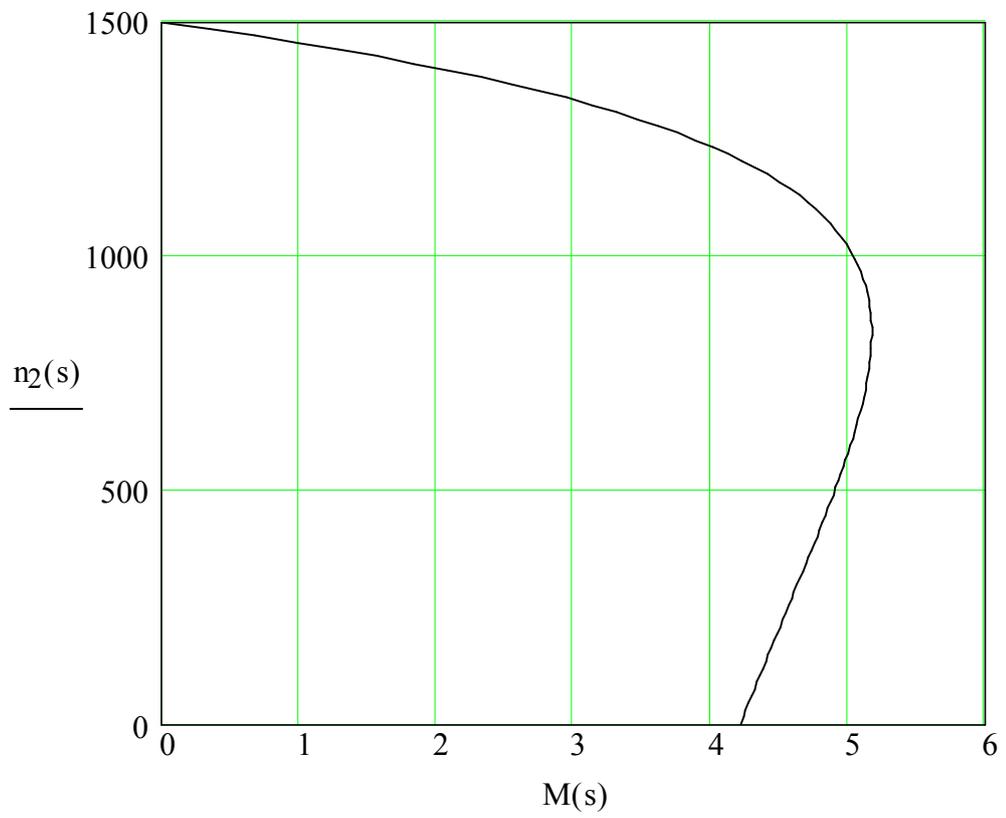
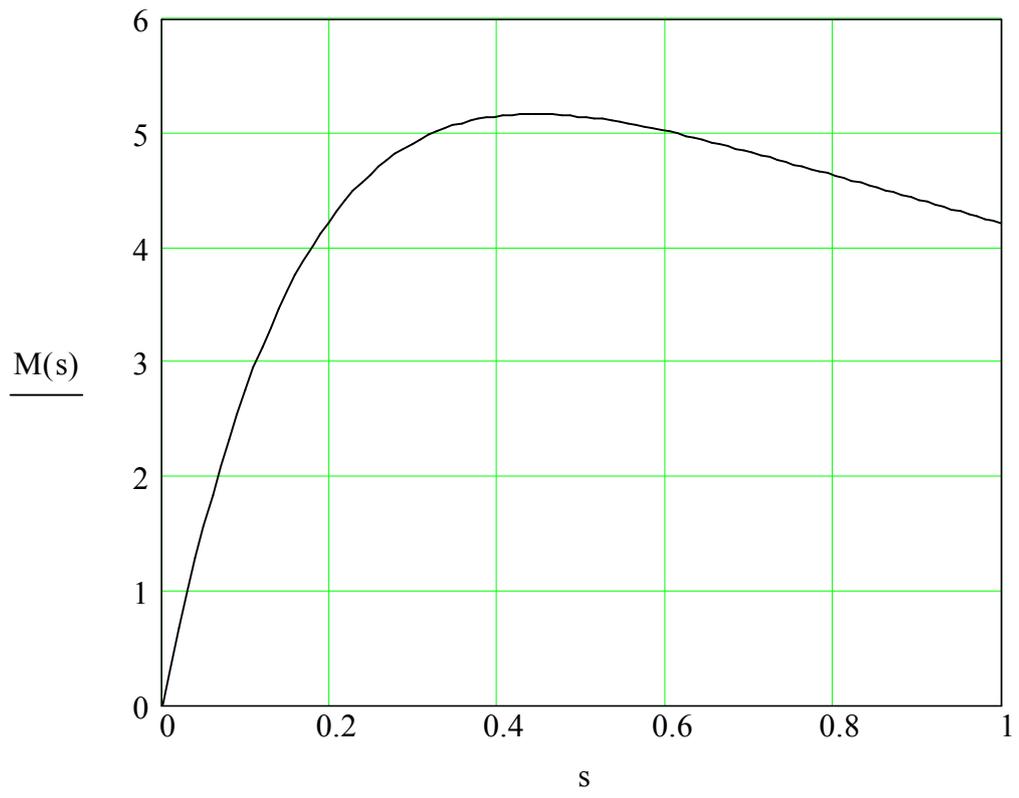
$M(1.5 \cdot s_H) = 3.41$   $n_2(1.5 \cdot s_H) = 1297.5$

$M(s_K) = 5.17$   $n_2(s_K) = 834.63$

$M(0.6) = 5.02$   $n_2(0.6) = 600.00$

$M(0.8) = 4.63$   $n_2(0.8) = 300.00$

$M(1.0) = 4.21$   $n_2(1) = 0$



### 3. Искусственные механические характеристики асинхронного двигателя

#### 3.1. Механическая характеристика асинхронного двигателя при изменении напряжения питания $U_1$

$$f_1 := f_{1H} \quad U_1 := k_u \cdot U_{1H}$$

$$M_{II}(s) := k_u^2 \cdot M(s)$$

$$n_{2II}(s) := n_1 \cdot (1 - s)$$

Результаты расчета:

$$U_1 = 154$$

$$M_{II}(0.0001) = 0$$

$$n_{2II}(0.0001) = 1499.85$$

$$M_{II}(0.5 \cdot s_H) = 0.71$$

$$n_{2II}(0.5 \cdot s_H) = 1432.5$$

$$M_{II}(s_H) = 1.26$$

$$n_{2II}(s_H) = 1365.00$$

$$M_{II}(1.5 \cdot s_H) = 1.67$$

$$n_{2II}(1.5 \cdot s_H) = 1297.5$$

$$M_{II}(s_K) = 2.53$$

$$n_{2II}(s_K) = 834.63$$

$$M_{II}(0.6) = 2.46$$

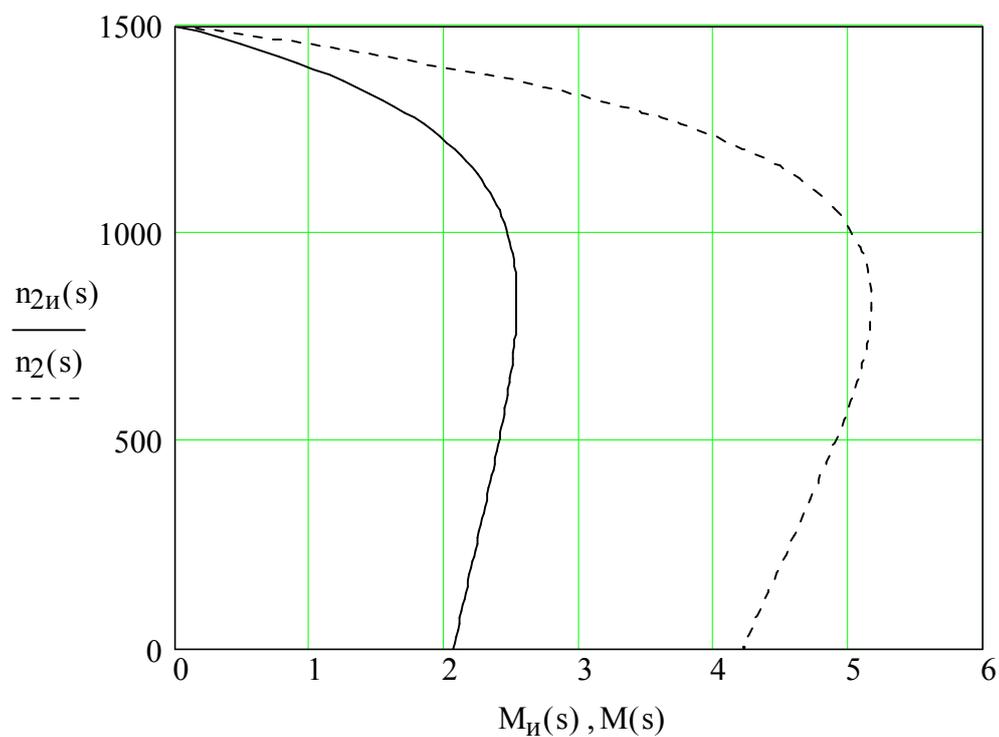
$$n_{2II}(0.6) = 600$$

$$M_{II}(0.8) = 2.27$$

$$n_{2II}(0.8) = 300$$

$$M_{II}(1.0) = 2.06$$

$$n_{2II}(1) = 0$$



3.2. Механическая характеристика асинхронного двигателя при изменении активного сопротивления фазной обмотки ротора  $R'_2$

$$f_1 := f_{1H} \quad U_1 := U_{1H} \quad R'_{2И} := k_{R2} \cdot R'_2$$

$$M_{И}(s) := \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot p \cdot R'_{2И}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot s \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R'_{2И}}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]}$$

$$s_{КИ} := \frac{R'_{2И}}{\sqrt{(R_1)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad n_{2И}(s) := n_1 \cdot (1 - s)$$

Результаты расчета:  $R'_{2И} = 51.56 \quad s_{КИ} = 0.89$

$$M_{И}(0.0001) = 0.002 \quad n_{2И}(0.0001) = 1499.85$$

$$M_{И}(s_H) = 1.44 \quad n_{2И}(s_H) = 1365$$

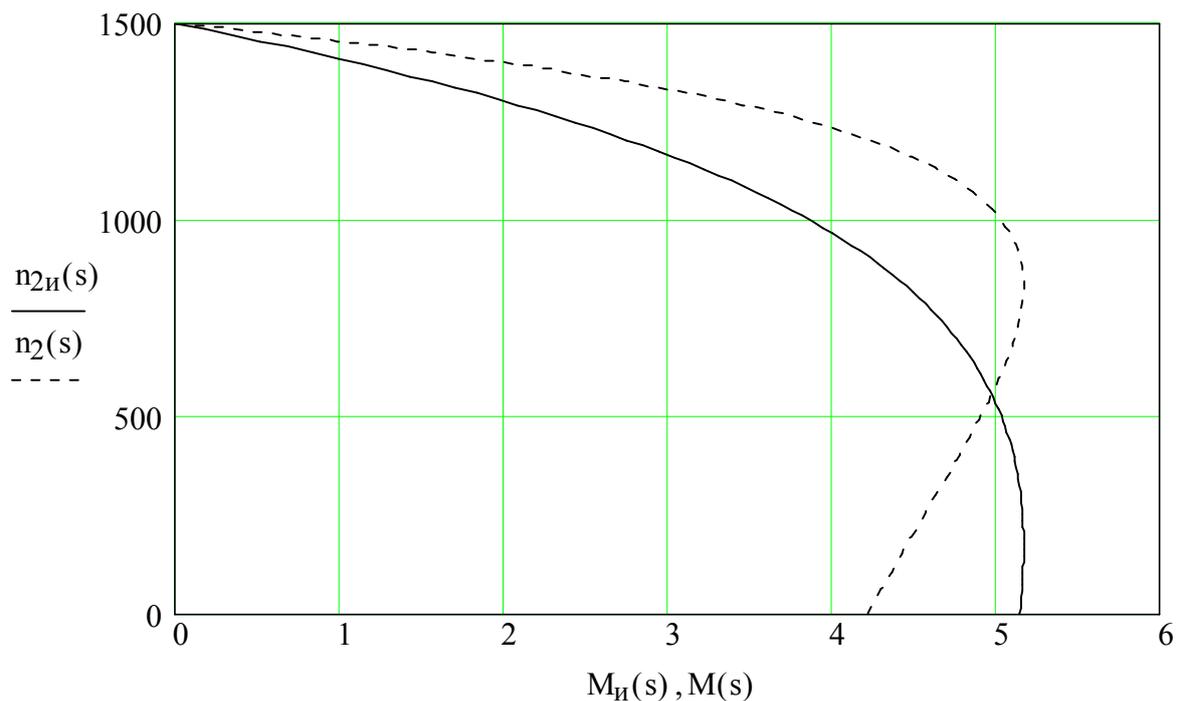
$$M_{И}(4 \cdot s_H) = 4.03 \quad n_{2И}(4 \cdot s_H) = 960$$

$$M_{И}(s_{КИ}) = 5.17 \quad n_{2И}(s_{КИ}) = 169.27$$

$$M_{И}(0.6) = 4.92 \quad n_{2И}(0.6) = 600$$

$$M_{И}(0.8) = 5.15 \quad n_{2И}(0.8) = 300$$

$$M_{И}(1.0) = 5.14 \quad n_{2И}(1) = 0$$



3.3. Механическая характеристика асинхронного двигателя при изменении частоты  $f_1$  и напряжения питания  $U_1$  по закону  $U_1/f_1 = \text{const}$

$$f_1 := k_f \cdot f_{1H} \quad U_1 := f_1 \cdot \frac{U_{1H}}{f_{1H}} \quad s := 0.0001, 0.01.. 1.0$$

$$n_{1H} := 60 \cdot \frac{f_1}{p} \quad n_{2H}(s) := n_{1H} \cdot (1 - s) \quad s_{KH} := \frac{R'_2}{\sqrt{(R_1)^2 + k_f^2 \cdot (X_1 + X'_2)^2}}$$

$$M_H(s) := \frac{3 \cdot U_{1H}^2 \cdot p \cdot R'_2 \cdot k_f}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H} \cdot s \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + k_f^2 \cdot (X_1 + X'_2)^2 \right]}$$

Результаты расчета:  $f_1 = 37.5$     $U_1 = 165$     $n_{1H} = 1125$     $s_{KH} = 0.53$

$$M_H(0.0001) = 0 \quad n_{2H}(0.0001) = 1124.9$$

$$M_H(s_H) = 1.94 \quad n_{2H}(s_H) = 1023.75$$

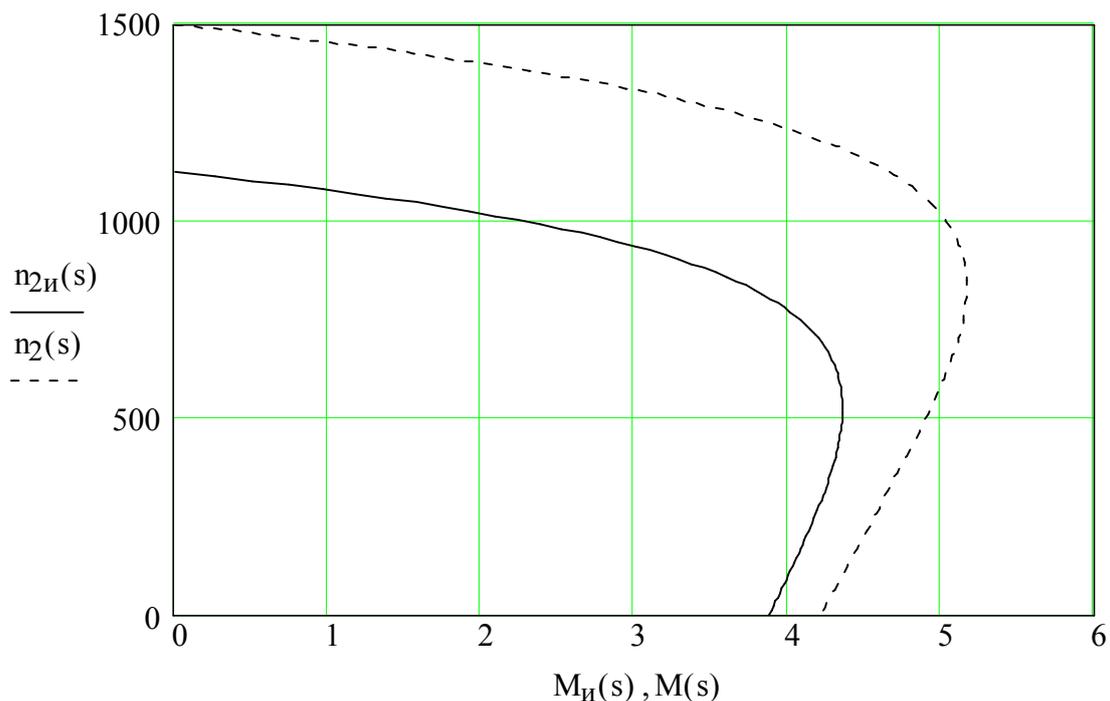
$$M_H(1.5 \cdot s_H) = 2.61 \quad n_{2H}(1.5 \cdot s_H) = 973.13$$

$$M_H(s_{KH}) = 4.36 \quad n_{2H}(s_{KH}) = 523.98$$

$$M_H(0.6) = 4.34 \quad n_{2H}(0.6) = 450$$

$$M_H(0.8) = 4.15 \quad n_{2H}(0.8) = 225$$

$$M_H(1.0) = 3.88 \quad n_{2H}(1) = 0$$



#### 4. Естественные рабочие характеристики асинхронного двигателя

$$U_1 := U_{1H} \quad f_1 := f_{1H} \quad n_2(s) := n_1 \cdot (1 - s) \quad j := \sqrt{-1}$$

$$I_{1XK} := \frac{U_1}{R_X + j \cdot X_X} \quad I'_{2K}(s) := \frac{U_1}{\left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right) + j \cdot (X_1 + X'_2)}$$

$$I_{1K}(s) := I_{1XK} + I'_{2K}(s)$$

$$I_1(s) := |I_{1K}(s)|$$

$$\cos\phi(s) := \frac{\operatorname{Re}(I_{1K}(s))}{I_1(s)}$$

$$P_1(s) := 3 \cdot U_1 \cdot I_1(s) \cdot \cos\phi(s)$$

$$P_{\text{мех}}(s) := 3 \cdot \left( |I'_{2K}(s)| \right)^2 \cdot R'_2 \cdot \frac{1 - s}{s}$$

$$M(s) := \frac{P_{\text{мех}}(s) \cdot 30}{n_2(s) \cdot \pi}$$

Расчет мощности потерь и ее составляющих в номинальном режиме работы асинхронного двигателя

$$s := s_H \quad \Delta P_{\text{ст}} := 3 \cdot \left( |I_{1XK}| \right)^2 \cdot R_X \quad \Delta P_{\text{эл.н}} := 3 \cdot \left( |I'_{2K}(s)| \right)^2 \cdot R_1$$

$$P_{1H} := \frac{P_{2H}}{\eta_H} \quad \Delta P_{\text{эл.н}} := 3 \cdot \left( |I'_{2K}(s)| \right)^2 \cdot R_2 \quad \Delta P_H := P_{1H} - P_{2H}$$

Результаты расчета:  $s_H = 0.090$

$$I_{1XK} = 0.09 - 0.8j \quad I'_{2K}(s) = 0.68 - 0.1j \quad I_{1K}(s) = 0.76 - 0.9j$$

$$I_1(s) = 1.18 \quad P_{1H} = 544.118 \quad \Delta P_H = 174.12$$

$$\Delta P_{\text{ст}} = 57.06 \quad \Delta P_{\text{эл.н}} = 43.97 \quad \Delta P_{\text{эл.н}} = 36.22$$

Расчет мощности механических потерь и эквивалентного момента трени:

$$\Delta P_{\text{мех}} := \Delta P_H - \left( \Delta P_{\text{эл.н}} + \Delta P_{\text{эл.н}} + \Delta P_{\text{ст}} \right) \quad M_{\text{тр}} := \frac{\Delta P_{\text{мех}} \cdot 30}{n_{2H} \cdot \pi}$$

Результаты расчета:

$$\Delta P_{\text{мех}} = 36.87 \quad M_{\text{тр}} = 0.258$$

Расчет скольжения асинхронного двигателя в режиме реального холостого хода

$$s := 0.0001$$

$$s_X := \operatorname{root} \left[ \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot p \cdot R'_2}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot s \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]} - M_{\text{тр}}, s \right]$$

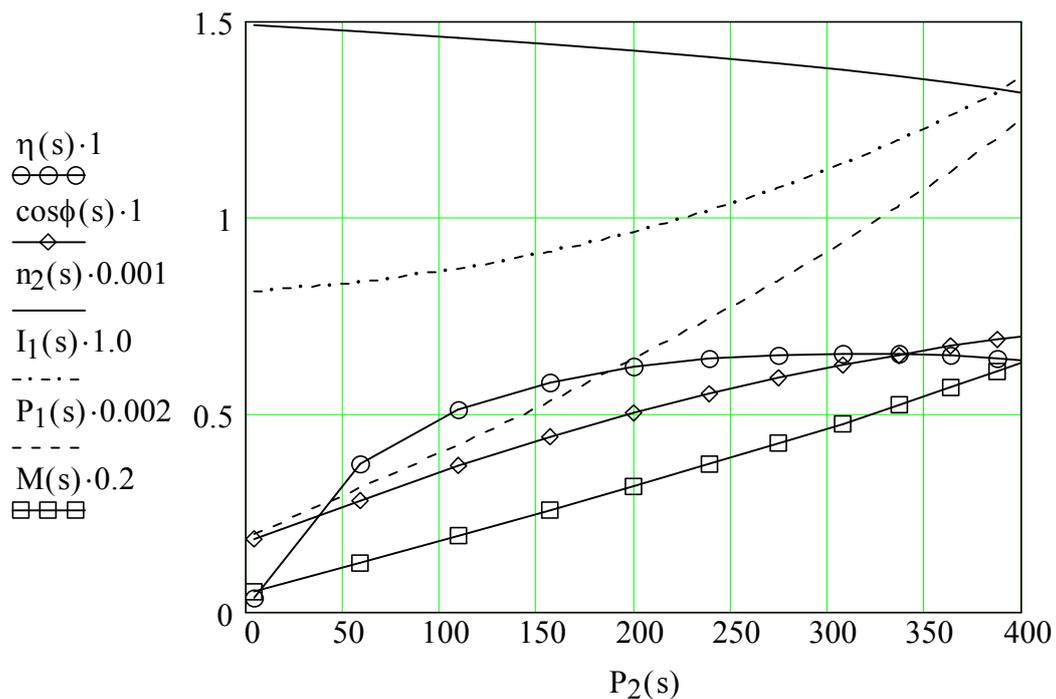
$$s_{xII} := 0.1 \cdot s_H \cdot \frac{M_{Tp}}{M(0.1 \cdot s_H)} \quad s_x = 0.0073 \quad s_{xII} = 0.007$$

$$P_2(s) := P_{Mex}(s) - \Delta P_{Mex} \quad \eta(s) := \frac{P_2(s)}{P_1(s)} \quad s_H = 0.09$$

Результаты расчета естественных рабочих характеристик  
асинхронного двигателя

$$U_1 := U_{1H} \quad f_1 := f_{1H} \quad s := s_x, 0.2 \cdot s_H \dots 1.5 \cdot s_H$$

s =	n <sub>2</sub> (s) =	M(s) =	I <sub>1</sub> (s) =	cosφ(s) =	η(s) =	P <sub>2</sub> (s) =	P <sub>1</sub> (s) =
0.007	1489	0.26	0.81	0.18	0.034	3.3	97.9
0.018	1473	0.62	0.84	0.28	0.374	58.4	156.2
0.029	1457	0.96	0.87	0.37	0.514	109.2	212.7
0.039	1441	1.28	0.91	0.44	0.583	156.1	267.6
0.050	1424.9	1.58	0.96	0.5	0.621	199.2	320.6
0.061	1408.9	1.87	1.02	0.55	0.641	238.6	371.9
0.071	1392.9	2.13	1.08	0.59	0.651	274.5	421.4
0.082	1376.9	2.39	1.14	0.63	0.655	307.1	469.2
0.093	1360.9	2.62	1.20	0.65	0.654	336.6	515.1
0.103	1344.9	2.84	1.26	0.67	0.649	363.2	559.3
0.114	1328.8	3.05	1.32	0.69	0.643	387.0	601.8
0.125	1312.8	3.24	1.38	0.7	0.635	408.2	642.6



**5. Обоснование применения энергосберегающего регулятора напряжения питания асинхронного двигателя**

$$M_c := k_u^2 \cdot M(s_H) \quad M := M_c \quad M_c = 1.26 \quad M = 1.26$$

5.1. Энергетические показатели асинхронного двигателя при номинальном напряжении питания

$$U_1 := U_{1H} \quad U_1 = 220$$

Скольжение асинхронного двигателя при  $M = M$

$$s := 0.0001$$

$$s := \text{root} \left[ \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot p \cdot R'_2}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot s \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]} - M, s \right] \quad s_e := s$$

$$I_{1XK} := \frac{U_1}{R_X + j \cdot X_X}$$

$$I'_{2K}(s) := \frac{U_1}{\left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right) + j \cdot (X_1 + X'_2)}$$

$$I_{1K}(s) := I_{1XK} + I'_{2K}(s)$$

$$I_1(s) := |I_{1K}(s)|$$

$$\cos\phi(s) := \frac{\text{Re}(I_{1K}(s))}{I_1(s)}$$

$$P_1(s) := 3 \cdot U_1 \cdot I_1(s) \cdot \cos\phi(s)$$

$$P_{\text{Mex}}(s) := 3 \cdot \left( |I'_{2K}(s)| \right)^2 \cdot R'_2 \cdot \frac{1-s}{s}$$

$$P_2(s) := P_{\text{Mex}}(s) - \Delta P_{\text{Mex}}$$

$$\eta(s) := \frac{P_2(s)}{P_1(s)}$$

Номинальный ток электродвигателя

$$I_{1H} := I_1(s_H)$$

Потребляемый из сети ток

$$I(s) := I_1(s)$$

Результаты расчета:  $s_e = 0.04$

$$I_{1H} = 1.18$$

$$I_1(s) = 0.91 \quad P_1(s) = 263.45$$

$$\cos\phi(s) = 0.44$$

$$I(s) = 0.91 \quad P_2(s) = 152.692$$

$$\eta(s) = 0.58$$

Пусковой ток и коэффициент мощности при пуске асинхронного двигателя

$$s := 1 \quad I_{\Pi}(s) := I_1(s)$$

$$I_{\Pi}(s) = 3.55$$

$$\cos\phi(s) = 0.65$$

Кратность пускового тока

$$k_i := \frac{I_{\Pi}(s)}{I_{1H}}$$

$$k_i = 3.01$$

5.2. Энергетические показатели асинхронного двигателя при пониженном напряжении питания

$$U_1 := k_u \cdot U_{1H} \quad U_1 = 154$$

Скольжение асинхронного двигателя при  $M = M$

$$s := 0.0001$$

$$s := \text{root} \left[ \left[ \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot p \cdot R'_2}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot s \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]} \right] - M, s \right] \quad s_H := s$$

$$I_{1XK} := \frac{U_1}{R_X + j \cdot X_X}$$

$$I'_{2K}(s) := \frac{U_1}{\left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right) + j \cdot (X_1 + X'_2)}$$

$$I_{1K}(s) := I_{1XK} + I'_{2K}(s)$$

$$I_1(s) := |I_{1K}(s)|$$

$$\cos\phi(s) := \frac{\text{Re}(I_{1K}(s))}{I_1(s)}$$

$$P_1(s) := 3 \cdot U_1 \cdot I_1(s) \cdot \cos\phi(s)$$

$$P_{\text{Mex}}(s) := 3 \cdot \left( |I'_{2K}(s)| \right)^2 \cdot R'_2 \cdot \frac{1-s}{s}$$

$$P_2(s) := P_{\text{Mex}}(s) - \Delta P_{\text{Mex}}$$

$$\eta(s) := \frac{P_2(s)}{P_1(s)}$$

Потребляемый из сети ток

$$I(s) := k_u \cdot I_1(s)$$

Результаты расчета:  $s_H = 0.09$

$$I_{1H} = 1.18$$

$$I_1(s) = 0.83 \quad P_1(s) = 246.675$$

$$\cos\phi(s) = 0.65$$

$$I(s) = 0.58 \quad P_2(s) = 142.557$$

$$\eta(s) = 0.58$$

Пусковой ток и коэффициент мощности при пуске асинхронного двигателя

$$s := 1 \quad I_{\Pi}(s) := k_u \cdot I_1(s)$$

$$I_{\Pi}(s) = 1.74$$

$$\cos\phi(s) = 0.65$$

Кратность пускового тока

$$k_i := \frac{I_{\Pi}(s)}{I_{1H}}$$

$$k_i = 1.47$$

## Контрольные вопросы и задачи

1. Определите частоту тока и индуктивное сопротивление ротора асинхронного двигателя в режиме работы, заданной точкой на кривой его механической характеристики.
2. Каковы мощности потерь в обмотках статора и ротора асинхронного двигателя в режиме работы, заданной точкой на кривой его механической характеристики?
3. Определите по паспортным данным и параметрам схемы замещения асинхронного двигателя коэффициент мощности цепи обмотки его ротора в номинальном, критическом и пусковом режимах.
4. Назовите причины, по которым для асинхронного двигателя при частотном регулировании нецелесообразно применение закона  $U = \text{const}$  в зоне низких частот вращения.
5. Почему при понижении напряжения сети у асинхронного двигателя, работающего с  $M_c = \text{const}$ , уменьшается КПД?
6. Как изменятся синхронная частота вращения  $n_1$ , критический момент  $M_k$  и ток намагничивания  $I_{1x}$  асинхронного двигателя, если частоту  $f_1$  напряжения питания уменьшить в 2 раза при  $U_1 = U_{1н}$ ?
7. Почему регулирование частоты вращения асинхронных двигателей основного исполнения изменением напряжения питания является неэффективным? Какие изменения конструкции асинхронных двигателей позволяют увеличить диапазон регулирования их частоты вращения этим способом?
8. Как изменится критический момент  $M_k$  асинхронного двигателя при уменьшении напряжения питания  $U_1$  и  $f_1 = f_{1н}$ , при увеличении активного сопротивления ротора  $R_{2н}' > R_2'$  и  $U_1 = U_{1н}$  и при увеличении частоты  $f_1$  по закону  $U_1 / f_1 = \text{const}$ ?

9. Назовите составляющие постоянных потерь мощности в асинхронном двигателе, физические причины их возникновения и объясните метод их расчета.
10. Как можно определить скольжение асинхронного двигателя, работающего с заданным моментом нагрузки  $M_c$  при пониженном напряжении питания, по его паспортным данным и параметрам схемы замещения?
11. Определите кратность пускового тока асинхронного двигателя при соединении обмоток звездой, если известно:  $U_1 = U_{1н} = 220$  В,  $I_{1н} = 40$  А,  $R_1 = 0,25$  Ом,  $X_1 = 0,4$  Ом,  $R_2' = 0,3$  Ом,  $X_2' = 0,47$  Ом. При расчете пренебречь током намагничивания  $I_{1х}$ .
12. При каких значениях скольжения момент и ток асинхронного двигателя достигают максимальных значений? От каких параметров двигателя и электрической сети они зависят?
13. Почему при изменении нагрузки асинхронного двигателя с  $M_c = 0$  до  $M_c = M_n$  увеличивается его  $\cos\varphi$ ?
14. Как и почему изменяется ток холостого хода  $I_{1х}$  асинхронного двигателя при увеличении воздушного зазора между статором и ротором?
15. Как изменятся критический момент  $M_k$ , критическое скольжение  $s_k$  и пусковой ток  $I_{1п}$  асинхронного двигателя, если его в ремонте сгоревшую обмотку статора перемотали без изменения числа ее витков проводом меньшего диаметра?
16. Почему у асинхронных двигателей малой мощности при регулировании частоты вращения по закону  $U_1 / f_1 = \text{const}$  с уменьшением частоты напряжения питания уменьшается критический момент?
17. Как изменяется коэффициент мощности обмотки ротора  $\cos\varphi_2$  асинхронного двигателя средней мощности при изменении частоты вращения в диапазоне  $n_1 \leq n_2 \leq n_{2н}$  и  $n_{2к} \leq n_2 \leq 0$ , если  $X_2' \approx 2R_2'$ ?
18. В чем заключается отличие механической характеристики асинхронного двигателя при изменении напряжения питания от механической ха-

рактеристики при изменении активного сопротивления цепи обмотки статора?

19. Почему при регулировании частоты вращения изменением напряжения питания используются асинхронные двигатели с повышенным активным сопротивлением обмотки ротора, а не асинхронные двигатели основного исполнения?
20. Как изменяется потребляемый асинхронным двигателем ток при регулировании его частоты вращения изменением активного сопротивления цепи ротора, если  $M_c = \text{const}$  ?
21. Почему понижение напряжения питания асинхронного двигателя, работающего с  $M_c < 0,6 M_n$ , позволяет повысить его  $\cos\varphi$  ?
22. Определите переменные потери мощности в асинхронном двигателе, если при  $M_c = 20$  Н·м его частота вращения  $n_2 = 1425$  мин<sup>-1</sup>,  $f_{1н} = 50$  Гц, а  $R_1 = R_2'$ ?
23. Какие потери мощности возникают в асинхронном двигателе при преобразовании в нем электрической энергии в механическую и как они зависят от его нагрузки?
24. Почему в пусковом режиме  $\cos\varphi$  асинхронных двигателей большой мощности меньше, чем у асинхронных двигателей малой мощности?
25. Почему в режиме реального холостого хода скольжение асинхронного двигателя не равно нулю и как его можно определить?

## Литература

1. Алиев И.И. Электротехнический справочник. – М.: ИП Радиософт, 2010. – 384 с.
2. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.М. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
3. Борисов Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н. Электротехника. – СПб.: БХВ – Петербург, 2012. – 592 с.
4. ГОСТ Р МЭК 60034-2-1-2009. Машины электрические вращающиеся. Часть 2-1. Стандартные методы определения потерь и коэффициента полезного действия по испытаниям (за исключением машин для подвижного состава). Введ. 2011-01-01. – М.: Стандартиформ, 2011. – 58 с.
5. Дьяконов В.П. Mathcad 11/12/13 в математике. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 958 с.
6. Дюбей Гопал К. Основные принципы устройства электроприводов. – М.: Техносфера, 2009. – 480 с.
7. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 544 с.
8. Пар И.Т., Захарова З.А. Энергосберегающие микропроцессорные регуляторы напряжения для асинхронного привода // Электротехн. пром-сть. Сер. 08. Электропривод. 1990. Вып. 28. С. 1 – 44.
9. Фираго Б.И., Павлячек Л.Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. – Мн.: Техноперспектива, 2006. – 363 с.

Таблица 1

Паспортные данные и параметры схемы замещения асинхронных двигателей ( $n_1 = 3000 \text{ мин}^{-1}$ )

Ва- риант	Тип электро- двигателя	$U_{1н},$ В	$f_{1н},$ Гц	$P_{2н},$ кВт	$n_{2н},$ $\text{мин}^{-1}$	$\eta_{н},$ %	$\cos\varphi_{н}$	$R_x,$ Ом	$X_x,$ Ом	$R_1,$ Ом	$X_1,$ Ом	$R_2',$ Ом	$X_2',$ Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	4АА63В2У3	220	50	0,55	2740	73	0,86	21,1	422	21,5	8,1	15,9	13,8
2	4А71А2У3	220	50	0,75	2820	77	0,87	15,3	343	15,6	6,7	8,3	10
3	4А71В2У3	220	50	1,1	2800	77,5	0,87	11,3	254	11,6	4,8	6,1	7,5
4	4А80А2У3	220	50	1,5	2870	81	0,85	5,5	170	5,6	3,4	3,3	5,4
5	4А80В2У3	220	50	2,2	2870	83	0,87	3,4	125	3,4	2,3	2,2	4,0
6	4А90L2У3	220	50	3,0	2870	84,5	0,88	2,6	124	2,6	2,1	1,7	3,6
7	4А100S2У3	220	50	4,0	2900	86,5	0,89	1,5	96,5	1,5	1,54	1,0	2,8
8	4А100L2У3	220	50	5,5	2900	87,5	0,91	1,0	81,1	1,1	1,14	0,76	2,3
9	4А112M2У3	220	50	7,5	2920	87,5	0,88	0,7	55,7	0,7	0,57	0,42	2,1
10	4А132M2У3	220	50	11,0	2930	88	0,90	0,41	44,5	0,42	0,64	0,26	1,26
11	4А160S2У3	220	50	15,0	2940	88	0,91	0,39	31,7	0,40	0,71	0,17	0,93
12	4А160M2У3	220	50	18,5	2940	88,5	0,92	0,31	29,3	0,31	0,59	0,14	0,77
13	4А180S2У3	220	50	22,0	2940	88,5	0,92	0,21	19,8	0,21	0,49	0,11	0,59
14	4А180M2У3	220	50	30,0	2945	90,5	0,90	0,15	15,3	0,15	0,29	0,071	0,43
15	4А200M2У3	220	50	37,0	2945	90	0,89	0,074	14,1	0,075	0,26	0,066	0,38
16	4А200L2У3	220	50	45,0	2945	91	0,90	0,07	13,2	0,071	0,23	0,053	0,34
17	4А225M2У3	220	50	55,0	2945	91	0,92	0,057	14,8	0,057	0,20	0,042	0,27
18	4А250S2У3	220	50	75,0	2960	91	0,89	0,032	7,65	0,033	0,125	0,024	0,20
19	4А250M2У3	220	50	90,0	2960	92	0,90	0,026	7,05	0,027	0,104	0,021	0,17
20	4А280S2У3	220	50	110,0	2940	91	0,89	0,018	4,15	0,018	0,093	0,014	0,13

Таблица 2

Паспортные данные и параметры схемы замещения асинхронных двигателей ( $n_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}$ )

Ва- риант	Тип электро- двигателя	$U_{1н},$ В	$f_{1н},$ Гц	$P_{2н},$ кВт	$n_{2н},$ $\text{мин}^{-1}$	$\eta_{н},$ %	$\cos\varphi_{н}$	$R_x,$ Ом	$X_x,$ Ом	$R_1,$ Ом	$X_1,$ Ом	$R_2',$ Ом	$X_2',$ Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
21	4A71A4Y3	220	50	0,55	1375	70,5	0,70	16,1	219	16,9	11,2	14,3	26,1
22	4A71B4Y3	220	50	0,75	1370	72	0,73	10,6	160,8	11,2	8,6	11,2	20,3
23	4A80A4Y3	220	50	1,1	1410	75	0,81	9,2	142,3	9,6	6,25	5,4	9,6
24	4A80B4Y3	220	50	1,5	1410	77	0,83	7,1	122,2	7,4	4,8	4,2	7,4
25	4A90L4Y3	220	50	2,2	1420	80	0,83	4,1	95,3	4,3	3,3	2,6	5,7
26	4A100S4Y3	220	50	3,0	1425	82	0,83	2,5	75	2,57	2,6	1,8	4,3
27	4A100L4Y3	220	50	4,0	1425	84	0,84	1,4	63,4	1,46	2,0	1,4	3,6
28	4A112M4Y3	220	50	5,5	1445	85,5	0,85	1,2	55,2	1,23	1,5	0,79	2,5
29	4A132S4Y3	220	50	7,5	1455	87,5	0,86	0,68	44,9	0,7	1,24	0,5	1,9
30	4A132M4Y3	220	50	11,0	1455	87,5	0,87	0,42	33,0	0,43	0,85	0,32	1,3
31	4A160S4Y3	220	50	15,0	1465	86,5	0,88	0,34	30,1	0,35	0,63	0,18	0,96
32	4A160M4Y3	220	50	18,5	1465	89,5	0,88	0,26	27,1	0,26	0,53	0,15	0,80
33	4A180S4Y3	220	50	22,0	1470	90	0,90	0,22	21,8	0,22	0,43	0,11	0,64
34	4A180M4Y3	220	50	30,0	1470	91	0,89	0,13	15,6	0,13	0,34	0,071	0,47
35	4A200M4Y3	220	50	37,0	1475	91	0,90	0,12	14,4	0,13	0,28	0,058	0,45
36	4A200L4Y3	220	50	45,0	1475	92	0,90	0,089	12,5	0,091	0,22	0,045	0,14
37	4A225M4Y3	220	50	55,0	1480	92,5	0,90	0,058	9,4	0,059	0,19	0,033	0,31
38	4A250S4Y3	220	50	75,0	1480	93	0,90	0,041	7,3	0,042	0,14	0,023	0,23
39	4A250M4Y3	220	50	90,0	1480	93	0,91	0,032	6,9	0,033	0,13	0,019	0,16
40	4A280S4Y3	220	50	110,0	1470	92,5	0,90	0,025	5,5	0,025	0,13	0,021	0,18

Таблица 3

Паспортные данные и параметры схемы замещения асинхронных двигателей ( $n_1 = 1000 \text{ мин}^{-1}$ )

Ва- риант	Тип электро- двигателя	$U_{1н},$ В	$f_{1н},$ Гц	$P_{2н},$ кВт	$n_{2н},$ мин-1	$\eta_{н},$ %	$\cos\varphi_{н}$	$R_x,$ Ом	$X_x,$ Ом	$R_1,$ Ом	$X_1,$ Ом	$R_2',$ Ом	$X_2',$ Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
41	4A71B6Y3	220	50	0,55	890	67,5	0,71	18,9	190	20,2	13,9	19,0	21,5
42	4A80A6Y3	220	50	0,75	900	69	0,74	14,7	159	15,8	11,9	11,9	19,8
43	4A80B6Y3	220	50	1,1	910	74	0,74	8,2	123	8,7	7,9	7,9	13,7
44	4A90L6Y3	220	50	1,5	930	75	0,74	5,6	102,3	5,9	5,9	4,7	10,2
45	4A100L6Y3	220	50	2,2	945	81	0,73	3,3	78,2	3,5	4,3	2,6	8,2
46	4A112MA6Y3	220	50	3,0	950	81	0,76	2,4	58,7	2,5	2,2	1,9	3,0
47	4A112MB6Y3	220	50	4,0	945	82	0,81	1,8	49,9	1,86	1,8	1,5	2,65
48	4A132MB6Y3	220	50	5,5	965	85	0,80	1,2	35,4	1,2	1,3	0,74	1,98
49	4A132M6Y3	220	50	7,5	965	85,5	0,81	0,78	29,0	0,80	0,94	0,53	1,47
50	4A160S6Y3	220	50	11,0	970	86	0,86	0,69	30,3	0,71	1,1	0,29	1,46
51	4A160M6Y3	220	50	15,0	975	87,5	0,87	0,44	22,8	0,46	0,74	0,21	1,18
52	4A180M6Y3	220	50	18,5	975	88	0,87	0,32	18,1	0,34	0,66	0,16	0,78
53	4A200M6Y3	220	50	22,0	975	90	0,90	0,26	22,5	0,27	0,59	0,13	0,75
54	4A200L6Y3	220	50	30,0	980	90,5	0,90	0,18	15,0	0,18	0,47	0,086	0,51
55	4A225M6Y3	220	50	37,0	980	91	0,89	0,13	12,1	0,13	0,32	0,060	0,41
56	4A250S6Y3	220	50	45,0	985	91,5	0,89	0,095	10,2	0,10	0,24	0,039	0,37
57	4A250M6Y3	220	50	55,0	985	91,5	0,89	0,071	7,5	0,07	0,18	0,030	0,28
58	4A280S6Y3	220	50	75,0	980	92	0,89	0,049	6,1	0,051	0,19	0,033	0,21
59	4A280M6Y3	220	50	90,0	980	92,5	0,89	0,039	4,8	0,040	0,15	0,025	0,16
60	4A315S6Y3	220	50	110,0	980	93	0,90	0,028	4,3	0,028	0,11	0,020	0,13

Таблица 4

Паспортные данные и параметры схемы замещения асинхронных двигателей ( $n_1 = 750 \text{ мин}^{-1}$ )

Ва- риант	Тип электро- двигателя	$U_{1н},$ В	$f_{1н},$ Гц	$P_{2н},$ кВт	$n_{2н},$ мин-1	$\eta_{н},$ %	$\cos\varphi_{н}$	$R_x,$ Ом	$X_x,$ Ом	$R_1,$ Ом	$X_1,$ Ом	$R_2',$ Ом	$X_2',$ Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
61	4A80B8Y3	220	50	0,55	675	64	0,65	16,8	158,6	18,7	17,6	16,5	31,8
62	4A90LA8Y3	220	50	0,75	695	68	0,62	10,3	117,2	11,4	12,2	9,0	23,7
63	4A90LB8Y3	220	50	1,1	690	70	0,68	7,4	96,6	8,2	9,4	6,9	18,9
64	4A100L8Y3	220	50	1,5	700	74	0,65	4,7	76,6	5,1	7,4	4,3	14,9
65	4A112MA8Y3	220	50	2,2	700	76,5	0,71	3,1	57,4	3,3	3,9	3,0	6,1
66	4A112MB8Y3	220	50	3,0	700	79,5	0,74	2,1	48,5	2,3	3,1	2,4	4,8
67	4A132S8Y3	220	50	4,0	720	83	0,70	1,4	35,7	1,4	2,1	1,2	3,6
68	4A132M8Y3	220	50	5,5	712	83	0,74	1,1	30,9	1,1	1,8	0,99	3,1
69	4A160S8Y3	220	50	7,5	730	86	0,75	0,88	26,6	0,94	1,7	0,4	2,25
70	4A160M8Y3	220	50	11,0	730	87	0,75	0,54	18,3	0,57	1,1	0,27	1,55
71	4A180M8Y3	220	50	15,0	730	87	0,82	0,42	17,4	0,44	0,90	0,21	1,17
72	4A200M8Y3	220	50	18,5	735	88	0,84	0,32	15,8	0,33	0,75	0,15	1,04
73	4A200L8Y3	220	50	22,0	730	88,5	0,84	0,29	15,9	0,30	0,69	0,14	0,88
74	4A225M8Y3	220	50	30,0	735	90,5	0,81	0,15	8,6	0,16	0,43	0,078	0,60
75	4A250S8Y3	220	50	37,0	740	90	0,83	0,048	8,5	0,050	0,32	0,050	0,53
76	4A250S8Y3	220	50	45,0	740	91	0,84	0,072	5,4	0,075	0,20	0,032	0,34
77	4A280S8Y3	220	50	55,0	735	92	0,84	0,068	5,3	0,071	0,25	0,045	0,29
78	4A280M8Y3	220	50	75,0	735	92,5	0,85	0,041	4,1	0,043	0,18	0,032	0,20
79	4A315S8Y3	220	50	90,0	735	93	0,85	0,028	3,5	0,029	0,14	0,024	0,17
80	4A315M8Y3	220	50	110,0	735	93	0,85	0,023	2,6	0,024	0,10	0,020	0,13



## Содержание

Введение.....	3
Порядок выполнения и оформления домашнего задания.....	4
Содержание и данные для выполнения домашнего задания.....	5
Основные теоретические положения и методические указания к выполнению домашнего задания.....	8
1. Устройство и схема замещения асинхронного двигателя.....	8
2. Естественные механические характеристики асинхронного двигателя .....	10
3. Искусственные механические характеристики асинхронного двигателя .....	13
4. Рабочие характеристики асинхронного двигателя .....	17
5. Обоснование применения энергосберегающего регулятора напряжения питания асинхронного двигателя .....	22
Пример расчета характеристик трехфазного асинхронного двигателя при помощи математической системы Mathcad.....	27
Контрольные вопросы и задачи .....	29
Литература .....	39
Паспортные данные и параметры схемы замещения асинхронных двигателей .....	40