

РОСЖЕЛДОР

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)**

А.А. Зарифьяном, М.В. Чавычалов, Н.В. Гребенниковым,
А.А. Андрющенко, Т.З. Талахадзе

Методическое обеспечение
для выполнения курсовой работы и самостоятельной работы магистрантов
по дисциплине «Разработка проектных решений изготовления узлов и деталей
подвижного состава»

Ростов-на-Дону
2015

УДК 621.3

Рецензент – доктор технических наук,
профессор кафедры «Теоретическая механика» П.Г. Иваночкин

Зарифьян, А.А.

Методическое обеспечение для выполнения курсовой работы и самостоятельной работы магистрантов по дисциплине «Разработка проектных решений изготовления узлов и деталей подвижного состава» / М.В. Чавычалов, Н.В. Гребенниковым, А.А. Андрющенко, Т.З. Талахадзе. ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2015. – 41 с.

Описаны основные практические сведения для проведения предварительных расчетов характеристик и элементов электроприводов. Даны примеры решения задач по разделам согласно рабочей программе дисциплины.

Соответствует дисциплине «Разработка проектных решений изготовления узлов и деталей подвижного состава» по направлению 15.04.01 Машиностроение, направленность «Моделирование и проектирование подвижного состава железных дорог».

Одобрено к изданию кафедрой «Локомотивы и локомотивное хозяйство».

© Зарифьян А.А.

© ФГБОУ ВО РГУПС, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| 1 ЭЛЕКТРОПРИВОД КАК СИСТЕМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ | 5 |
| 1.1 АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА | 5 |
| 1.2 АНАЛИЗ ПОТЕРЬ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА | 7 |
| 1.3 ЗАДАЧИ ПО РАЗДЕЛУ 1 | 8 |
| 2 МЕХАНИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ | 10 |
| 2.1 ВЫБОР ТИПА ПЕРЕДАТОЧНОГО МЕХАНИЗМА | 10 |
| 2.2 ЗАДАЧИ ПО РАЗДЕЛУ 2 | 12 |
| 3 ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С АСИНХРОННЫМИ И СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ..... | 16 |
| 3.1 ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ АСИНХРОННОГО ПРИВОДА..... | 16 |
| 3.2 ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА | 18 |
| 3.3 ЗАДАЧИ ПО РАЗДЕЛУ 3. | 20 |
| 4 ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА..... | 27 |
| 4.1 РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА | 27 |
| 4.2 ЗАДАЧИ ПО РАЗДЕЛУ 4. | 32 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 39 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК..... | 40 |

ВВЕДЕНИЕ

Электропривод является одним из ключевых элементов различных технических систем. Масштабы применения электропривода в различных сферах жизни позволяет оценить тот факт, что на работу электроприводов тратится более 60% электроэнергии в мире.

Используемые в настоящее время тяговые электроприводы, как правило, основаны на использовании полупроводниковых преобразователей, микропроцессорных систем управления и т.д. Однако, для построения сложных алгоритмов управления, необходимо наличие понимать физические основы функционирования структурных элементов электропривода. Кроме того, для построения простых систем электропривода может быть экономически целесообразно использование элементарного реостатного регулирования. Именно из этих соображений настоящее пособие содержит материал, с одной стороны дополняющий лекционный курс некоторыми практическими аспектами, с другой – способный помочь инженеру построить несложную систему электропривода.

Для углубленного освоения материала рекомендуются источники [1-3].

1 ЭЛЕКТРОПРИВОД КАК СИСТЕМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

1.1 АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Электрическим приводом называется электромеханическая система, состоящая из электродвигательного, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочего механизма и управления этим движением. Структурная схема электропривода в общем виде представлена на рис. 1.1.

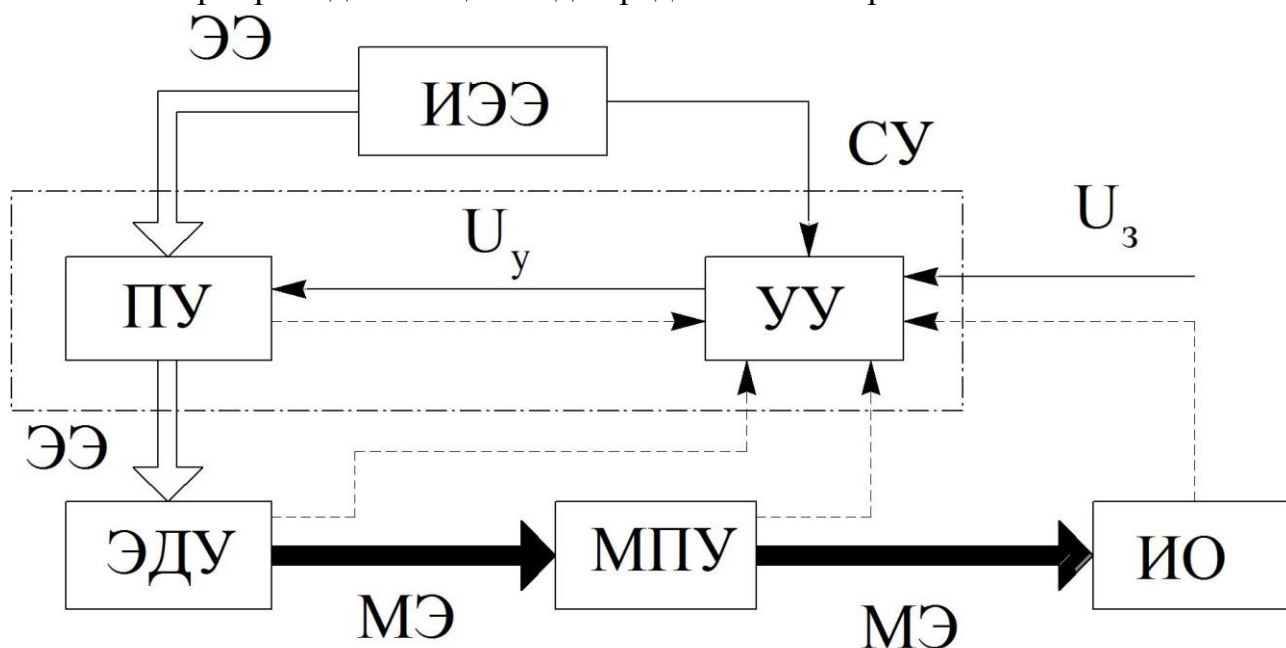


Рис. 1.1. Структурная схема электропривода

Для выполнения своих функций электроприводу необходим источник электрической энергии **ИЭЭ**. В большинстве случаев в качестве **ИЭЭ** выступает однофазная или трехфазная сеть переменного тока промышленной частоты, для промышленных электроприводов могут быть использованы цеховая сеть постоянного тока, аккумуляторная батарея, дизель-генераторная установка и солнечная батарея.

Вырабатываемая электроприводом механическая энергия передается различным исполнительным органам рабочих механизмов (колесным парам локомотива или моторного вагона, ленте транспортера или конвейера, кабине лифта, шпинделю токарного станка, патрону сверлильного станка, крыльчатке насоса, поршню компрессора и др.) и при необходимости регулируется в соответствии с требованиями к режимам работы исполнительного органа.

За счет полученной энергии исполнительный орган совершает требуемое движение, обеспечивая тем самым движение подвижного состава или выполнение производственных и технологических операций: транспортировку грузов и людей, обработку деталей, транспортировку жидкости или газа и т.д.

Основой любого электропривода является электродвигательное устройство (электродвигатель) **ЭДУ**, который обеспечивает преобразование электрической энергии **ЭЭ** в механическую **МЭ**. В настоящее время в подавляющем числе

случаев в электроприводах используются асинхронные электродвигатели (с короткозамкнутым и фазным ротором), в меньшей степени распространены коллекторные электродвигатели постоянного тока (независимого, параллельного, смешанного и последовательного возбуждения), синхронные и вентильные электродвигатели, набирают популярность бесщёточные электродвигатели постоянного тока (brushless DC motor) и вентильно-индукторные электродвигатели (switched reluctance motor). Для точного перемещения исполнительного органа (станки с числовым программным управлением) используются шаговые двигатели. В ряде случаев для поступательного движения исполнительного органа используют линейные двигатели различных конструкций.

Для преобразования параметров электроэнергии в соответствии с требованиями ЭДУ и получения требуемого движения ИО служит электрическое преобразовательное устройство ПУ. В электроприводах с ЭДУ постоянного тока используются управляемые и неуправляемые выпрямители, а также импульсные преобразователи, в электроприводах с ЭДУ переменного тока используются частотные преобразователи, выполненные по различным схемам.

Для преобразования параметров механической энергии, поступающей с вала ЭДУ к ИО, служит механическое передаточное устройство МПУ. В подавляющем большинстве случаев в качестве МПУ используются редукторы различных конструкций (зубчатые цилиндрические и конические, червячные, планетарные и т.д.), а также различные передачи (ременные, цепные, карданные и т.д.). Для преобразования вида движения используются кривошипно-шатунные механизмы, передачи «винт-гайка», реечные передачи. Движущаяся часть ЭДУ, МПУ, ИО и различные соединительные устройства составляют механическую часть электропривода.

Управление процессом преобразования энергии осуществляется с помощью управляющего устройства УУ, которое вырабатывает управляющий сигнал U_y в функции задающего сигнала U_z (входной сигнал или сигнал уставки) и дополнительных сигналов, содержащих информацию о процессе преобразования энергии, реальных параметрах движения ЭДУ или ИО и т.д. Эти сигналы необходимы для обеспечения так называемой обратной связи и показаны на рисунке 1 штриховыми линиями. Использование этих сигналов позволяет получить требуемые характеристики движения ЭД и ИО, достичь оптимального режима работы производственных механизмов, обеспечить защиту и блокировки при работе электропривода. Эти сигналы вырабатываются соответствующими датчиками (датчики частоты вращения и положения, датчики тока и напряжения, плавные и конечные выключатели и т.д.). В качестве УУ может выступать микроконтроллер, программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), а также различные релейно-контакторные схемы. ПУ и УУ образуют систему управления электропривода СУ, которая вместе с обмотками ЭДУ составляет электрическую часть электропривода.

1.2 АНАЛИЗ ПОТЕРЬ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Для определения энергетической эффективности системы электропривода чаще всего рассматривают величину его КПД

$$\eta = \frac{P_{пол}}{P_{затр}} = \frac{P_{пол}}{P_{пол} + \Delta P},$$

где $P_{пол}$ – полезная мощность, $P_{затр}$ – затраченная мощность, ΔP – потери мощности.

КПД электропривода будет зависеть от всех элементов электромеханической системы, т.е.

$$\eta_{эн} = \eta_{сy} \cdot \eta_{эд} \cdot \eta_{пер} \cdot \eta_{ио},$$

где $\eta_{сy}$ – КПД системы управления, $\eta_{эд}$ – КПД электродвигателя, $\eta_{пер}$ – КПД механической передачи, $\eta_{ио}$ – КПД исполнительного органа.

Системы управления современных электроприводов, как правило, строятся на базе микропроцессорных устройств управления и полупроводниковых преобразователях. Такие системы обладают достаточно низкими потерями энергии, и даже с учетом реактивных элементов в преобразователе КПД системы управления составляет не менее 0,95-0,98.

КПД электродвигателя зависит от режима его работы. При этом суммарные потери мощности ΔP разделяют на постоянные K и переменные V .

$$\Delta P = K + V.$$

В нерегулируемом электроприводе к постоянным потерям в электродвигателе относят потери в стали (магнитопроводе), потери на трение (включая самовентиляцию) и добавочные потери. К переменным относят потери в меди (обмотках электродвигателя), т.е. для двигателей постоянного тока

$$V = I_{я}^2 \cdot R_{я},$$

где $I_{я}$ – ток якоря, $R_{я}$ – активное сопротивление якоря.

Для асинхронных двигателей переменные потери определяются как

$$V = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 + 3 \cdot I_2^2 \cdot r_2,$$

где I_1 и I_2 – токи статора и ротора, r_1 и r_2 – активные сопротивления статора и ротора.

Потери в роторной цепи пропорциональны моменту M , частоте вращения магнитного поля статора ω_0 и скольжению s .

$$3 \cdot I_2^2 \cdot r_2 = M \cdot \omega_0 \cdot s.$$

Предполагая, что потери в статорной и роторной цепи соотносятся как сопротивления r_1 и r_2 , можно определить переменные потери в электроприводе как

$$V = M \cdot \omega_0 \cdot s \left(1 + \frac{r_1}{r_2} \right).$$

Для регулируемого электропривода при оценке потерь рассматривают две группы способов управления:

– «реостатные», для которых характерно постоянное значение ω_0 (включение в цепь ротора добавочных сопротивлений, изменение амплитуды напряжения на зажимах асинхронного двигателя при постоянной частоте и т.д.);

– «безреостатные», при использовании которых величина ω_0 изменяется (изменение тока возбуждения двигателей постоянного тока, частотное и векторное управление асинхронными двигателями, прямое управление моментом и т.д.).

При использовании «реостатных» способов управления потери мощности определяются как

$$\Delta P = M \cdot (\omega_0 - \omega) = P_1 \cdot s,$$

где P_1 – электромагнитная мощность, s – скольжение.

Для двигателей постоянного тока или асинхронных двигателей с фазным ротором при включении добавочных сопротивлений в цепь ротора часть потерь мощности будет рассеиваться в тепло вне корпуса электродвигателя. При использовании «реостатного» управления асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором ΔP в полном объеме будет рассеиваться в тепло внутри электродвигателя, что должно быть учтено при проектировании системы электропривода.

Для «безреостатных» способов регулирования, как правило, не характерны статические режимы работы, поэтому потери мощности и энергии определяются по результатам расчетов переходных процессов. При этом большое внимание отдается расчету потерь энергии, которые определяются как

$$\Delta A_{mn} = \int_0^{t_{mn}} \Delta P(t) dt = \int_0^{t_{mn}} (K(t) + V(t)) dt,$$

где t_{mn} – время переходного процесса.

Приведенное уравнение позволяет осуществить расчет потерь энергии для заданного режима работы электропривода. В качестве примера для потерь энергии в электроприводе с двигателем постоянного тока независимого возбуждения в режиме пуска вхолостую получаем

$$\Delta A_{mn} = \int_0^{t_{mn}} \Delta P(t) dt = \int_0^{t_{mn}} M(\omega_0 - \omega) dt.$$

Из общего уравнения движения электропривода при моменте сопротивления $M_c=0$ имеем

$$dt = J \frac{d\omega}{M}.$$

Откуда получаем потери энергии

$$\Delta A_{mn} = \int_0^{\omega_0} J(\omega_0 - \omega) d\omega = J \frac{\omega_0^2}{2}.$$

1.3 ЗАДАЧИ ПО РАЗДЕЛУ 1

Задача 1.1. Определить КПД асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором АИР160S4 при нагрузке 40%. Технические данные двигателя: номинальная мощность $P_n=15$ кВт, номинальная частота вращения ротора,

$n_n=1460$ об/мин, КПД в номинальном режиме $\eta=0,89$, отношение активного сопротивления обмотки статора к приведенному активному сопротивлению обмотки ротора $r_1/r'_2=0,6$.

Решение

Потери в двигателе в номинальном режиме работы

$$\Delta P_n = \frac{P_n \cdot (1 - \eta_n)}{\eta_n} = \frac{15 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,89)}{0,89} = 1854 \text{ Вт.}$$

Частота вращения ротора в номинальном режиме

$$\omega_n = \frac{2\pi \cdot n_n}{60} = \frac{2\pi \cdot 1460}{60} = 153 \text{ с}^{-1}.$$

Для двигателя АИР160S4 число пар полюсов $p=2$. При частоте питающего напряжения $f_1=50$ Гц получаем частоту вращения магнитного поля

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p} = \frac{2\pi \cdot 50}{2} = 157 \text{ с}^{-1}.$$

Скольжение в номинальном режиме

$$s_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0} = \frac{157 - 153}{157} = 0,025.$$

Переменные потери в двигателе в номинальном режиме работы определяются по формуле

$$V_n = \frac{P_n}{\omega_n} \cdot \omega_0 \cdot s_n \left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right) = \frac{15 \cdot 10^3}{153} \cdot 157 \cdot 0,025(1 + 0,6) = 615 \text{ Вт.}$$

Постоянные потери

$$K = \Delta P_n - V_n = 1854 - 615 = 1239 \text{ Вт.}$$

Переменные потери в заданном режиме работы двигателя определим из предположения, что двигатель работает на линейной части механической характеристики. Получаем

$$V_{40\%} = 0,4 \cdot \frac{P_n}{\omega_n} \cdot \omega_0 \cdot 0,4 \cdot s_n \left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right) = 0,16 \cdot V_n = 0,16 \cdot 615 = 98,4 \text{ Вт.}$$

Полные потери мощности в заданном режиме работы

$$\Delta P_{40\%} = K + V_{40\%} = 1239 + 98,4 \approx 1337 \text{ Вт.}$$

КПД двигателя в заданном режиме работы

$$\eta_{40\%} = \frac{0,4 \cdot P_n}{0,4 \cdot P_n + \Delta P_{40\%}} = \frac{0,4 \cdot 15 \cdot 10^3}{0,4 \cdot 15 \cdot 10^3 + 1337} = 0,817.$$

КПД в заданном режиме работы снижен в сравнении с номинальным на 7,3%.

Задача 1.2. потери мощности в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором АИР112МА6 при работе на естественной характеристике с моментом сопротивления $M_c=0,9 \cdot M_n$. Технические данные двигателя: номинальная мощность $P_n=3$ кВт, номинальная частота вращения ротора, $n_n=940$ об/мин, КПД в номинальном режиме $\eta=0,81$, отношение активного сопротивления обмотки статора к приведенному активному сопротивлению обмотки ротора $r_1/r'_2=0,6$.

Решение

Потери в двигателе в номинальном режиме работы

$$\Delta P_n = \frac{P_n \cdot (1 - \eta_n)}{\eta_n} = \frac{3 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,81)}{0,81} = 640 \text{ Вт.}$$

Частота вращения ротора в номинальном режиме

$$\omega_n = \frac{2\pi \cdot n_n}{60} = \frac{2\pi \cdot 940}{60} = 98,4 \text{ с}^{-1}.$$

Для двигателя АИР112МА6 число пар полюсов $p=3$. При частоте питающего напряжения $f_1=50$ Гц получаем частоту вращения магнитного поля

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p} = \frac{2\pi \cdot 50}{3} = 105 \text{ с}^{-1}.$$

Скольжение в номинальном режиме

$$s_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0} = \frac{105 - 98,4}{105} = 0,063.$$

Номинальный момент на валу двигателя

$$M_n = \frac{1000 \cdot P_n}{\omega_n} = \frac{1000 \cdot 3}{98,4} = 30,5 \text{ Нм.}$$

Предполагая, что участок механической характеристики, на котором работает двигатель, является линейным, при заданном моменте сопротивления скольжение двигателя равно

$$s_3 = s_n \frac{M_c}{M_n} = 0,063 \frac{0,9 \cdot 30,5}{30,5} = 0,057.$$

Переменные потери в двигателе в номинальном режиме работы определяются по формуле

$$V_n = M_n \cdot \omega_0 \cdot s_n \left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right) = 30,5 \cdot 105 \cdot 0,063 (1 + 0,6) = 323 \text{ Вт.}$$

Постоянные потери

$$K = \Delta P_n - V_n = 640 - 323 = 317 \text{ Вт.}$$

Переменные потери в заданном режиме работы двигателя

$$V_3 = M_c \cdot \omega_0 \cdot s_3 \left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right) = 0,9 \cdot 30,5 \cdot 105 \cdot 0,057 (1 + 0,6) = 263 \text{ Вт.}$$

Полные потери мощности в заданном режиме работы

$$\Delta P_3 = K + V_3 = 317 + 263 \approx 580 \text{ Вт.}$$

2 МЕХАНИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

2.1 ВЫБОР ТИПА ПЕРЕДАТОЧНОГО МЕХАНИЗМА

Как правило, при проектировании электропривода проблема выбора передаточного устройства сводится к выбору передаточного отношения, поскольку тип механического преобразователя, как правило, определяется условиями эксплуатации электропривода, типом и габаритами технологической установки. Для тягового привода тип передаточного устройства – одноступенчатый цилиндрический редуктор для локомотивов или электропоездов или двухступенчатый для

высокоскоростных поездов. Для промышленного привода при возможности расположения электродвигателя вблизи рабочего механизма, а также при сравнительно большом передаваемом моменте, рационально использование редукторов с зубчатыми передачами различных типов. В обратном случае, при сравнительно небольшом моменте и необходимости размещения двигателя на расстоянии от рабочего механизма, рационально использовать ременные передачи. Выбор типа зубчатой передачи зависит от взаимного расположения осей вращения ротора электродвигателя и исполнительного органа рабочего механизма: при параллельном расположении осей выбирают цилиндрическую передачу, при пересекающихся осях – коническую. Как правило, сложные в технической реализации передаточные устройства (например, планетарная передача) редко используются в технологических установках железнодорожных предприятий.

При выборе передаточного отношения необходимо учитывать следующие условия:

– для уменьшения габаритных размеров передаточного устройства необходимо выбирать передаточное отношение наименьшим;

– для уменьшения нагрузки и механического воздействия на двигатель необходимо передаточное отношение выбирать наибольшим.

Исходя из этого, рационально принимать передаточное отношение оптимальным по минимуму времени переходного процесса (быстродействию электропривода).

Приведенный момент инерции в общем случае принимают

$$J = k \cdot J_{\partial} + \frac{J_{\mathcal{M}}}{i^2},$$

где $k = 1, 1, 1, 3$ – коэффициент, учитывающий момент инерции передачи, J_{∂} , $J_{\mathcal{M}}$ – моменты инерции двигателя и механизма соответственно, i – передаточное отношение передающего устройства.

Уравнение движения электропривода

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\partial} \pm M_c$$

где ω – частота вращения, M_{∂} – момент двигателя, M_c – приведенный к валу двигателя статический момент сопротивления.

Пренебрегая потерями в механической передаче, M_c определяется как

$$M_c = \frac{M_{\mathcal{M}}}{i},$$

где $M_{\mathcal{M}}$ – эквивалентный момент сопротивления механизма.

В качестве переходного процесса рассмотрим пуск электропривода до частоты вращения, соответствующей статическому режиму ω_c . Время переходного процесса в этом случае

$$t_{n.n} = \int_0^{\omega_c} \frac{\left(k \cdot J_{\partial} + \frac{J_{\mathcal{M}}}{i^2} \right) d\omega}{M_{\partial} - M_c} = \frac{\left(i^2 \cdot k \cdot J_{\partial} + J_{\mathcal{M}} \right) \omega_c}{M_{\partial} \cdot i^2 - M_c \cdot i^2} = \frac{\left(i^2 \cdot k \cdot J_{\partial} + J_{\mathcal{M}} \right) \omega_{\mathcal{M}}}{M_{\partial} \cdot i - M_{\mathcal{M}}},$$

где ω_m – частота вращения исполнительного органа рабочего механизма, соответствующая статическому режиму работы электропривода.

Минимальному времени переходного процесса соответствует случай

$$\frac{dt_{n.n}}{di} = 0.$$

$$\frac{2(M_\delta \cdot i - M_m)ikJ_\delta \omega_m - (i^2 \cdot k \cdot J_\delta + J_m)\omega_m M_\delta}{(M_\delta \cdot i - M_m)^2} = 0$$

Откуда получено

$$i_{opt} = \frac{M_m}{M_\delta} + \sqrt{\left(\frac{M_m}{M_\delta}\right)^2 + \frac{J_m}{kJ_\delta}}$$

Видно, что оптимальное передаточное отношение зависит от режима работы электропривода и моментов инерции его элементов.

2.2 ЗАДАЧИ ПО РАЗДЕЛУ 2

Задача 2.1. Нагрузочная диаграмма механизма задана таблицей 2.1. Вал исполнительного органа рабочего механизма вращается с частотой $\omega_m=34$ рад/с. Требуется подобрать подходящий двигатель серии АИР.

Таблица 2.1

Исходные данные к решению задачи 2.1.

| Интервал времени t , с | 0...3 | 3...7,5 | 7,5...14 | 14...18 |
|-------------------------------|-------|---------|----------|---------|
| Момент сопротивления M , Нм | 8 | 5 | 6,7 | 12 |

Решение

Средний момент нагрузки определяем по формуле

$$M_{cp} = k \frac{\sum_{i=1}^n M_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} = k \frac{\sum_{i=1}^n M_i \cdot t_i}{t_\Sigma},$$

где k – коэффициент запаса, принимаемый в интервале 1,1...1,3.

Задаваясь значением $k=1,1$, получаем

$$M_{cp} = 1,1 \frac{8 \cdot 3 + 5 \cdot 4,5 + 6,7 \cdot 6,5 + 12 \cdot 4}{3 + 4,5 + 6,5 + 4} = 8,44 \text{ Нм}.$$

По известным значениям требуемой частоты вращения и среднего момента сопротивления определяется механическая мощность на валу исполнительного органа рабочего механизма

$$P_m = M_{cp} \cdot \omega_m = 8,44 \cdot 34 = 287 \text{ Вт}.$$

Требуемая мощность двигателя определяется из формулы

$$P_{\partial} = \frac{P_m}{\eta_p},$$

где η_p – КПД редуктора.

Принимая $\eta_p = 0,98$, получаем

$$P_{\partial} = \frac{287}{0,98} = 292 \text{ Вт}.$$

Выбираем стандартный двигатель АИР63А2 номинальной мощности $P_n = 0,37$ кВт (370 Вт), номинальная частота вращения ротора $n_n = 2800$ об/мин.

Момент на валу двигателя определим из формулы

$$M_n = \frac{1000 \cdot P_n}{\omega_n},$$

где ω_n – частота вращения ротора, рад/с.

Получаем

$$\omega_n = \frac{2\pi \cdot n_n}{60} = \frac{2\pi \cdot 2800}{60} = 293 \text{ рад/с},$$

$$M_n = \frac{1000 \cdot 0,37}{293} = 1,26 \text{ Нм}.$$

Зная частоту вращения ротора двигателя определим требуемой передаточное отношение передачи

$$i = \frac{\omega_n}{\omega_m} = \frac{293}{34} = 8,6.$$

Выбираем для передачи двухступенчатый редуктор с передаточными числами: первая ступень $i_1 = 4,0$, вторая ступень $i_2 = 2,24$. Общее передаточное число передачи

$$i_p = i_1 \cdot i_2 = 4,0 \cdot 2,24 = 8,96.$$

Получаем фактическое значение частоты вращения вала исполнительного органа рабочего механизма

$$\omega_{мф} = \frac{\omega_{\partial}}{i_p} = \frac{293}{8,96} = 32,7 \text{ рад/с}.$$

Отклонение частоты вращения от заданного значения составляет

$$\frac{\omega_m - \omega_{мф}}{\omega_m} \cdot 100\% = \frac{34 - 32,7}{34} \cdot 100\% = 3,8\%,$$

Т.е. выбранные двигатель и редуктор могут использоваться для обеспечения технологического процесса по заданной нагрузочной диаграмме.

Приведенный к валу двигателя момент сопротивления нагрузки

$$M_c = \frac{M_{сп}}{\eta_p \cdot i_p} = \frac{8,44}{0,98 \cdot 8,96} = 0,96 \text{ Нм}.$$

Запас двигателя по моменту составляет

$$\frac{M_n}{M_c} = \frac{1,26}{0,96} = 1,3.$$

Для нормальной работы двигатель должен иметь запас по моменту 1,1...1,3. Выбранный двигатель отвечает этим требованиям и может использоваться для работы в механизме с заданной нагрузочной диаграммой.

Задача 2.2

Для механизма лебедки (рис. 2.1) требуется построить диаграмму момента на валу двигателя и скорости подъема груза. Исходные данные: масса груза $m_{гр}=980$ кг, ускорение и замедление при достижении максимальной скорости движения груза и снижении ее до нуля $a=0,22$ м/с², передаточное отношение редуктора $i=25$, момент инерции барабана $J_{\delta}=75$ кг·м², момент инерции ротора двигателя $J_p=1,3$ кг·м², моменты инерции зубчатых колес редуктора соответственно $J_{зк1}=0,07$ кг·м² и $J_{зк2}=5,5$ кг·м², номинальная частота вращения ротора двигателя $n_n=1000$ об/мин, КПД редуктора $\eta_p=0,95$, высота подъема груза $h=28$ м, радиус барабана $R_{\delta}=0,24$ м.

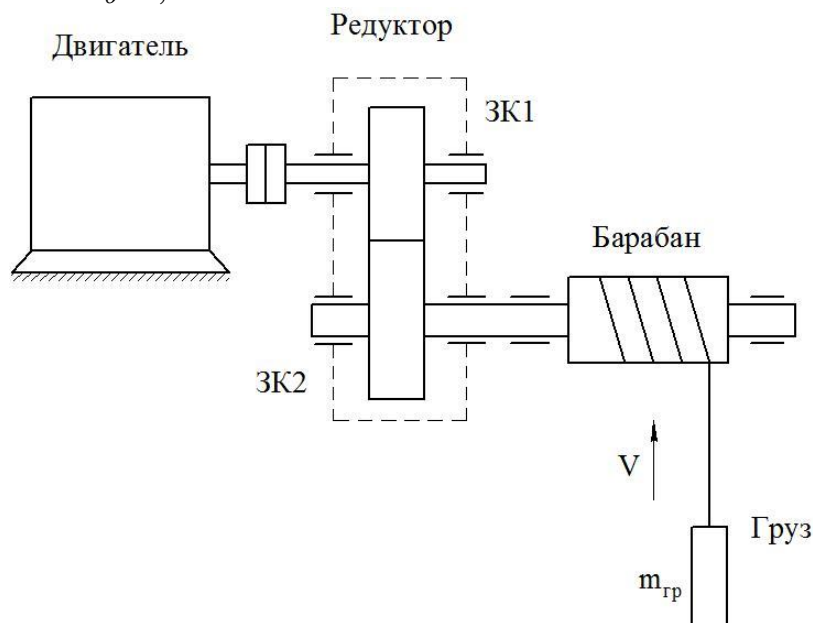


Рис. 2.1. Кинематическая схема лебедки

Решение

При решении задачи будем рассматривать три интервала времени: пуск двигателя и разгон до номинальной частоты вращения ротора (интервал 1), работа на номинальной частоте вращения (интервал 2) и снижение частоты вращения двигателя до 0 (интервал 3).

Частота вращения ротора двигателя в номинальном режиме

$$\omega_n = \frac{2\pi \cdot n_n}{60} = \frac{2\pi \cdot 1000}{60} = 105 \text{ рад/с.}$$

Частота вращения барабана при номинальной частоте вращения

$$\omega_{\delta} = \frac{\omega_n}{i} = \frac{105}{25} = 4,2 \text{ рад/с.}$$

Скорость перемещения груза

$$v = \omega_{\delta} \cdot R_{\delta} = 4,2 \cdot 0,24 = 1,01 \text{ м/с.}$$

Время ускорения и замедления груза при подъеме

$$t_1 = t_3 = \frac{v}{a} = \frac{1,01}{0,22} = 4,6 \text{ с.}$$

Путь, проходимый грузом при ускорении (замедлении)

$$s_1 = s_3 = \frac{a \cdot t^2}{2} = \frac{0,22 \cdot 4,6^2}{2} = 2,3 \text{ м.}$$

Время, в течение которого двигатель работает на номинальной частоте вращения

$$t_2 = \frac{h - (s_1 + s_3)}{v_{\text{сп}}} = \frac{28 - (2,3 + 2,3)}{1,01} = 23,2 \text{ с.}$$

Статический момент на валу барабана

$$M_{\text{сб}} = m_{\text{сп}} \cdot g \cdot R_{\text{б}} = 980 \cdot 9,81 \cdot 0,24 = 2307 \text{ Нм.}$$

Приведенный к валу двигателя момент сопротивления

$$M_c = \frac{M_{\text{сб}}}{i \cdot \eta_p} = \frac{2307}{25 \cdot 0,95} = 97,1 \text{ Нм.}$$

Приведенный к валу двигателя момент инерции механизма

$$J_{\Sigma} = J_p + J_{\text{ЗК1}} + \frac{J_{\text{ЗК2}} + J_{\text{б}} + m_{\text{сп}} \cdot R_{\text{б}}^2}{i^2} = 1,3 + 0,07 + \frac{5,5 + 75 + 980 \cdot 0,24^2}{25^2} = 1,59 \text{ кгм}^2.$$

Момент на валу двигателя в интервале времени 1

$$M_1 = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} + M_c = 1,59 \cdot \frac{105}{4,6} + 97,1 = 133 \text{ Нм.}$$

Момент двигателя в интервале времени 2

$$M_2 = M_c = 97,1 \text{ Нм.}$$

Момент двигателя в интервале времени 3

$$M_3 = M_c - J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = 97,1 - 1,59 \cdot \frac{105}{4,6} = 60,8 \text{ Нм.}$$

По результатам расчета строим диаграмму изменения момента двигателя и скорости перемещения груза при подъеме (рис. 2.2).

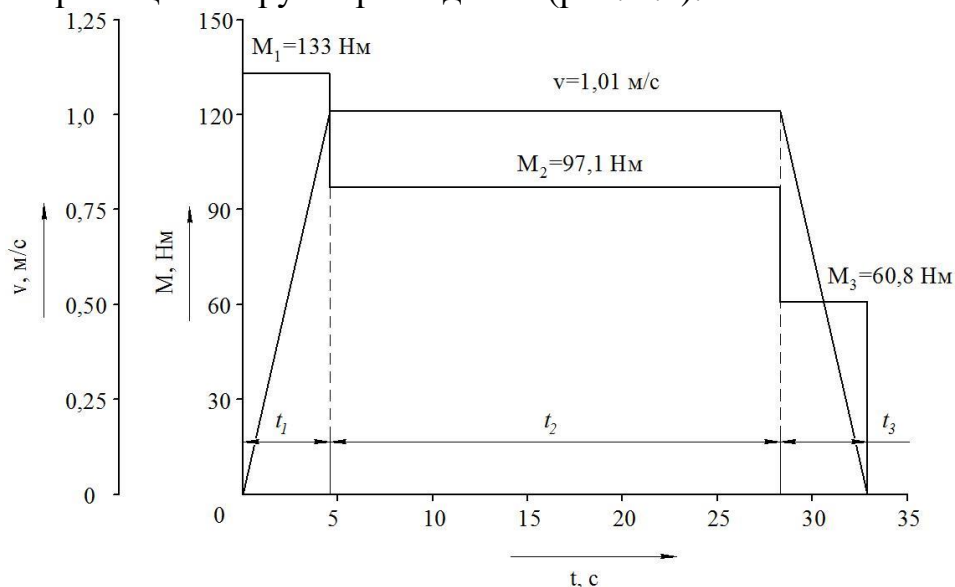


Рис. 2.2. Диаграмма момента двигателя и скорости перемещения груза при подъеме

3 ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С АСИНХРОННЫМИ И СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

3.1 ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ АСИНХРОННОГО ПРИВОДА

Пусковые режимы любых типов электропривода требуют особого внимания, поскольку при пуске противо-ЭДС стремится к нулю, что обуславливает высокое значение тока. Как правило, асинхронные двигатели с к.з. ротором рассчитаны с учетом использования прямого пуска. При использовании мощных двигателей для ограничения пускового тока в цепь статора включают добавочные сопротивления (рис. 3.1). Иногда в качестве добавочных сопротивлений используются реакторы (катушки индуктивности с высоким реактивным сопротивлением.)

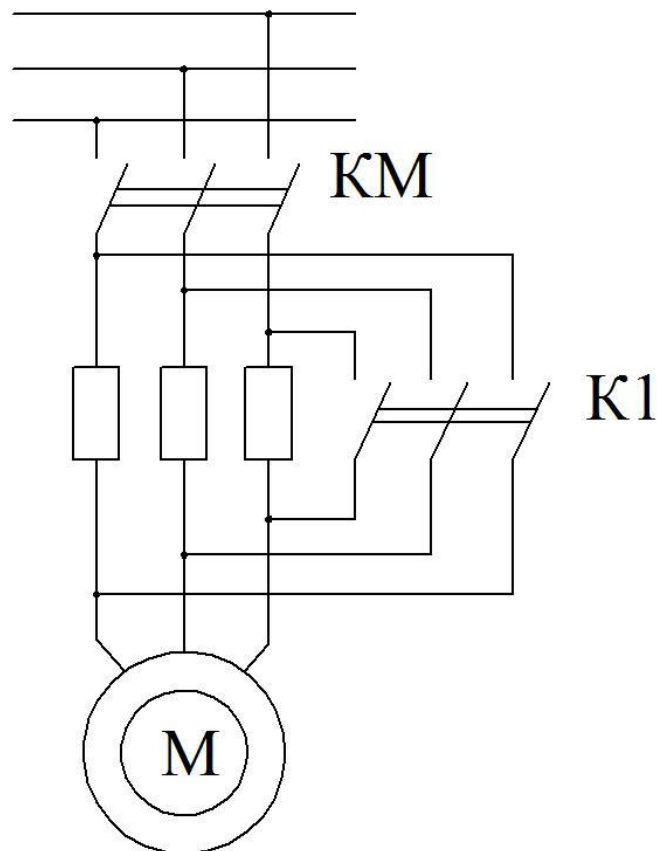


Рис. 3.1. Реостатный пуск асинхронного двигателя

При включении добавочных сопротивлений в цепь статора снижаются токи короткого замыкания статора и ротора, но остается неизменным значение частоты вращения магнитного поля статора.

Двигатели с фазным ротором предоставляют возможность ограничения пусковых токов в роторной обмотке. Наиболее простой способ – включение в цепь ротора добавочных сопротивлений. На рис. 3.2 приведена схема асинхронного электропривода на базе двигателя с фазным ротором, обеспечивающая возможность реализации пуска с использованием добавочных сопротивлений.

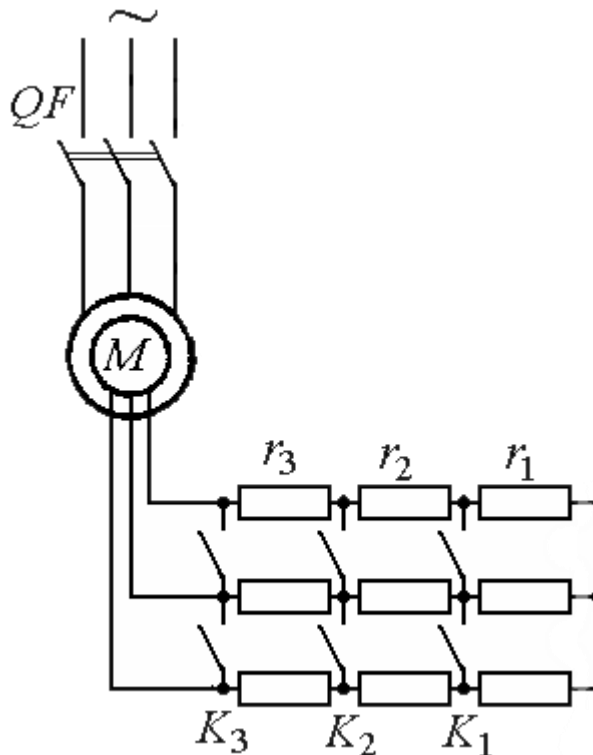


Рис. 3.2. Схема асинхронного электропривода

Расчет добавочных сопротивлений в цепи ротора может осуществляться аналитически или графо-аналитически. В качестве исходных данных должны быть указаны номинальная мощность двигателя P_n , номинальная частота вращения ротора n_n , напряжение на зажимах статора U_1 , номинальное напряжение на зажимах ротора E_{2n} , критический момент на валу двигателя M_k , номинальный ток ротора I_{2n} .

Номинальный момент на валу двигателя определяется по формуле

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n},$$

где ω_n – частота вращения ротора в рад/с, определяемая как

$$\omega_n = \frac{2\pi \cdot n_n}{60}$$

Перегрузочная способность двигателя

$$\lambda = \frac{M_k}{M_n}.$$

По маркировке или паспортным данным определяется численное значение частоты вращения магнитного поля статора ω_0 , далее определяется номинальное скольжение

$$s_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0}$$

Критическое скольжение

$$s_k = s_n \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 + 1})$$

Далее задаваясь значениями скольжения от 0,05 до 1 с интервалом не более 0,1, рассчитывается естественная механическая характеристика двигателя по формуле Клосса

$$M = \frac{2\lambda \cdot M_n}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}$$

Для дальнейшего расчета необходимо задаться двумя значениями момента: пусковой момент M_I и момент M_{II} , при котором переключается ступень пускового реостата.

$$M_{II} = (1,2 \dots 1,4) \cdot M_n,$$

$$M_I = \lambda' \cdot M_{II},$$

где

$$\lambda' = \sqrt[m+1]{\frac{1}{s_n \cdot \frac{M_I}{M_n}}},$$

здесь m – число ступеней пускового реостата.

При этом необходимо выполнение условия $M_I < M_K$.

Номинальное сопротивление ротора

$$R_{2n} = \frac{E_{2n}}{\sqrt{3} \cdot I_{2n}}$$

Далее при аналитическом расчете определяются сопротивления ступеней пускового реостата (приводится для случая $m=3$):

- сопротивление m -й ступени

$$R_m = R_{2n} \cdot s_n \cdot (\lambda' - 1)$$

- сопротивление $(m-1)$ -й определяется как

$$R_{m-1} = R_m \cdot (\lambda' + 1)$$

3.2 ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Синхронные двигатели с регулируемым возбуждением позволяют компенсировать реактивную мощность, потребляемую из сети расположенными на предприятии асинхронными двигателями. При этом синхронный двигатель выполняет механическую работу, потребляя из сети активную энергию и генерируя в сеть реактивную энергию. Схему включения двигателей можно представить в виде рис. 3.3.

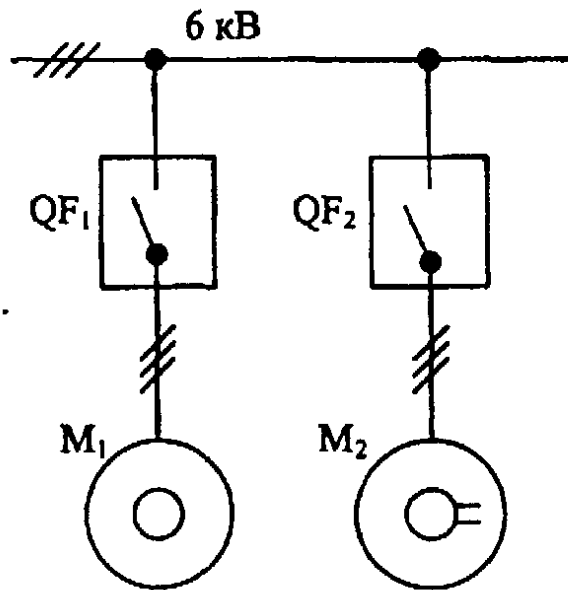


Рис. 3.3. Включение синхронного двигателя в одну сеть с асинхронным.

При работе асинхронного двигателя с номинальной нагрузкой реактивная мощность, циркулирующая в цепи его статора определяется по формуле

$$Q_{AD} = \sqrt{3} \cdot U_{1л} \cdot I_{1л} \cdot \sin \varphi_n,$$

где $U_{1л}$ – линейное напряжение на зажимах статора, $I_{1л}$ – линейный ток статора.

Для компенсации реактивной мощности асинхронного двигателя синхронный двигатель должен работать с опережающим $\cos \varphi$ и реактивным током

$$I_p = \frac{Q_{AD}}{\sqrt{3} \cdot U_{1л}}$$

Активный ток синхронного двигателя определяется по формуле

$$I_a = \frac{P_{CD}}{\sqrt{3} \cdot U_{1л} \cdot \eta_{CD}}$$

где P_{CD} – мощность синхронного двигателя, η_{CD} – КПД синхронного двигателя.

Полный ток статора асинхронного двигателя

$$I_1 = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$$

КПД синхронного двигателя в требуемом режиме работы

$$\cos \varphi_{mp} = \frac{I_a}{I_1}.$$

Номинальный угол нагрузки синхронного двигателя из упрощенного уравнения угловой характеристики определяется как

$$\theta_n = \arcsin \left(\frac{1}{\lambda_{CD}} \right)$$

где λ_{CD} – перегрузочная способность синхронного двигателя.

Из векторной диаграммы синхронного двигателя определяется индуктивное сопротивление обмоток статора синхронного двигателя

$$x_1 = \frac{U_{1\phi} \cdot \sin \theta_n}{I_{1n} \cdot \cos(\varphi_n - \theta_n)},$$

где I_{1n} – номинальный ток статора синхронного двигателя, $U_{1\phi}$ – фазное напряжение на зажимах статора.

Номинальная ЭДС в обмотке статора

$$E_{1n} = \frac{P_n \cdot x_1}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \sin \theta_n},$$

где P_n – номинальная мощность синхронного двигателя.

Для заданного режима работы синхронного двигателя угол нагрузки определяется как

$$\theta_{mp} = \frac{I_1 \cdot x_1 \cdot \cos \varphi_{mp}}{U_{1\phi} - I_1 \cdot x_1 \cdot \sin \varphi_{mp}}$$

Из уравнения угловой характеристики синхронного двигателя для заданного режима работы получаем требуемую ЭДС

$$E_{1mp} = \frac{P \cdot x_1}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \sin \theta_{mp}}$$

Предполагая, что ЭДС пропорциональна току возбуждения, для заданного режима работы двигателя имеем

$$I_{внр} = I_{вн} \frac{E_{1mp}}{E_{1n}},$$

где $I_{вн}$ – номинальный ток обмотки возбуждения синхронного двигателя.

3.3 ЗАДАЧИ ПО РАЗДЕЛУ 3.

Задача 3.1

Асинхронный двигатель с фазным ротором имеет следующие параметры:

- номинальная мощность на валу двигателя $P_n=125$ кВт;
- номинальная частота вращения ротора $n_n=585$ об/мин;
- номинальный ток обмотки ротора $I_{2n}=175$ А;
- отношение максимального момента на валу двигателя к номинальному $\lambda=3,7$.

Требуется:

1. рассчитать и построить механическую характеристику и зависимость $I_2(\omega)$;
2. для значений частоты вращения $n_p=560$ об/мин при работе двигателя с моментом на валу $M_p=0,85M_n$ рассчитать величину добавочного сопротивления в цепи ротора и построить искусственную механическую характеристику.

Решение

Номинальная частота вращения ротора в рад/с определяется по формуле

$$\omega_n = \frac{2\pi \cdot n_n}{60} = \frac{2\pi \cdot 585}{60} = 61,2 \text{ рад/с.}$$

Ближайшее значение синхронной частоты вращения $\omega_0=62,8$ рад/с (600 об/мин). При этом номинальное скольжение составляет

$$s_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0} = \frac{62,8 - 61,2}{62,8} = 0,025.$$

Номинальный момент на валу электродвигателя

$$M_n = \frac{1000 \cdot P_n}{\omega_n} = \frac{1000 \cdot 125}{61,2} = 2042 \text{ Нм.}$$

Критическое скольжение двигателя

$$s_k = s_n (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = s_n (3,7 + \sqrt{3,7^2 - 1}) = 0,18.$$

Расчет механической характеристики производим по упрощенной формуле Клосса

$$M = \frac{2\lambda \cdot M_n}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}$$

Задавая значениями скольжения от 0 до 1 с интервалом 0,1 и обязательным расчетом для критического скольжения, рассчитаем механическую характеристику двигателя (таблица 3.1). Пересчет частоты вращения осуществляется по формуле

$$\omega = (1 - s) \cdot \omega_0.$$

Таблица 3.1

Механическая характеристика асинхронного электродвигателя с фазным ротором

| | | | | | | | | | | | | |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| s | 0 | 0,1 | 0,18 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 |
| ω , рад/с | 62,8 | 56,5 | 51,5 | 50,2 | 44,0 | 37,7 | 31,4 | 25,1 | 18,8 | 12,6 | 6,3 | 0,0 |
| M , Нм | 0 | 6415 | 7555 | 7514 | 6667 | 5655 | 4816 | 4159 | 3645 | 3236 | 2906 | 2635 |
| I_2 , А | 0 | 617 | 899 | 945 | 1090 | 1159 | 1196 | 1218 | 1231 | 1240 | 1247 | 1251 |

Графически представим рассчитанную механическую характеристику (рис. 3.1).

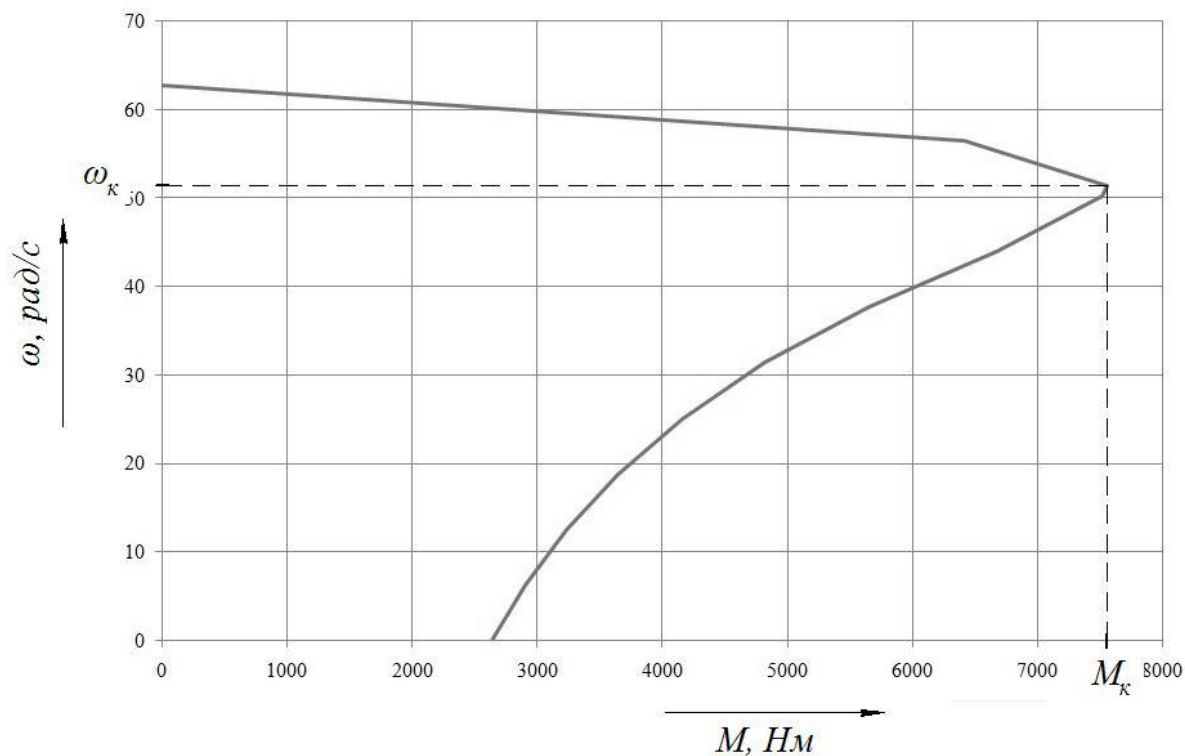


Рис. 3.1. Естественная механическая характеристика электродвигателя
Активное сопротивление ротора определяется по формуле

$$R_2 = \frac{M_n \cdot \omega_0 \cdot s_n}{m_2 \cdot I_{2n}^2},$$

где m_2 – число фаз обмотки ротора (для всех двигателей $m_2=3$).

Получаем

$$R_2 = \frac{2042 \cdot 62,4 \cdot 0,025}{3 \cdot 175^2} = 0,035 \text{ Ом} .$$

Для рассчитанных точек механической характеристики рассчитаем зависимость $I_2(\omega)$ по формуле и внесем полученные данные в таблицу 3.1.

$$I_2 = \sqrt{\frac{M \cdot \omega_0 \cdot s}{m_2 \cdot R_2}}.$$

Построим график полученной зависимости

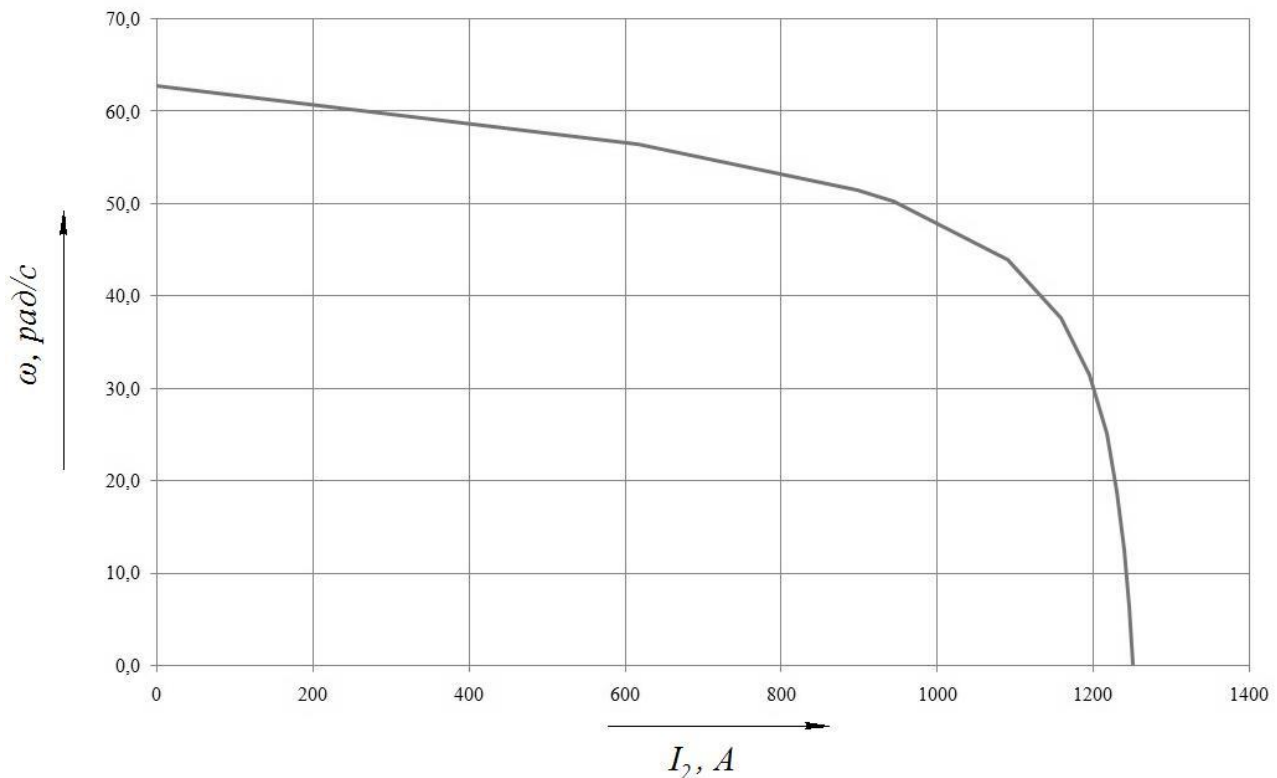


Рис. 3.2. Зависимость $I_2(\omega)$

При работе двигателя с частотой вращения ротора n_{p1} величина скольжения составит

$$\omega_p = \frac{2\pi \cdot n_p}{60} = \frac{2\pi \cdot 560}{60} = 58,6 \text{ рад/с},$$

$$s_p = \frac{\omega_0 - \omega_p}{\omega_0} = \frac{62,4 - 58,6}{62,4} = 0,06.$$

Величина скольжения при работе электродвигателя на естественной механической характеристике с моментом M_p определяется из формулы

$$s_e = s_n \cdot \frac{M_p}{M_n} = s_n \cdot \frac{0,85 \cdot M_n}{M_n} = 0,025 \cdot 0,85 = 0,021.$$

Величина добавочного сопротивления в цепи ротора, необходимого для работы двигателя с частотой вращения n_{p1} и моментом M_p определяется по формуле

$$R_\partial = R_2 \cdot \left(\frac{s_p}{s_e} - 1 \right) = 0,035 \cdot \left(\frac{0,06}{0,021} - 1 \right) = 0,065 \text{ Ом}.$$

Критическое скольжение при работе электродвигателя на искусственной механической характеристике определяется как

$$s_{kp} = s_\kappa \cdot \frac{R_2 + R_\partial}{R_2} = 0,18 \cdot \frac{0,065 + 0,035}{0,035} = 0,51.$$

При известном критическом скольжении по упрощенной формуле Клосса рассчитаем искусственную механическую характеристику и внесем полученные данные в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

Искусственная механическая характеристика асинхронного электродвигателя с фазным ротором

| | | | | | | | | | | | | |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| s | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,51 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 |
| ω , рад/с | 62,8 | 56,5 | 50,2 | 44,0 | 37,7 | 31,4 | 30,8 | 25,1 | 18,8 | 12,6 | 6,3 | 0,0 |
| M_p , Нм | 0 | 2853 | 5136 | 6604 | 7338 | 7554 | 7555 | 7457 | 7192 | 6849 | 6482 | 6116 |

По рассчитанным точкам строим искусственную механическую характеристику (рис. 3.3).

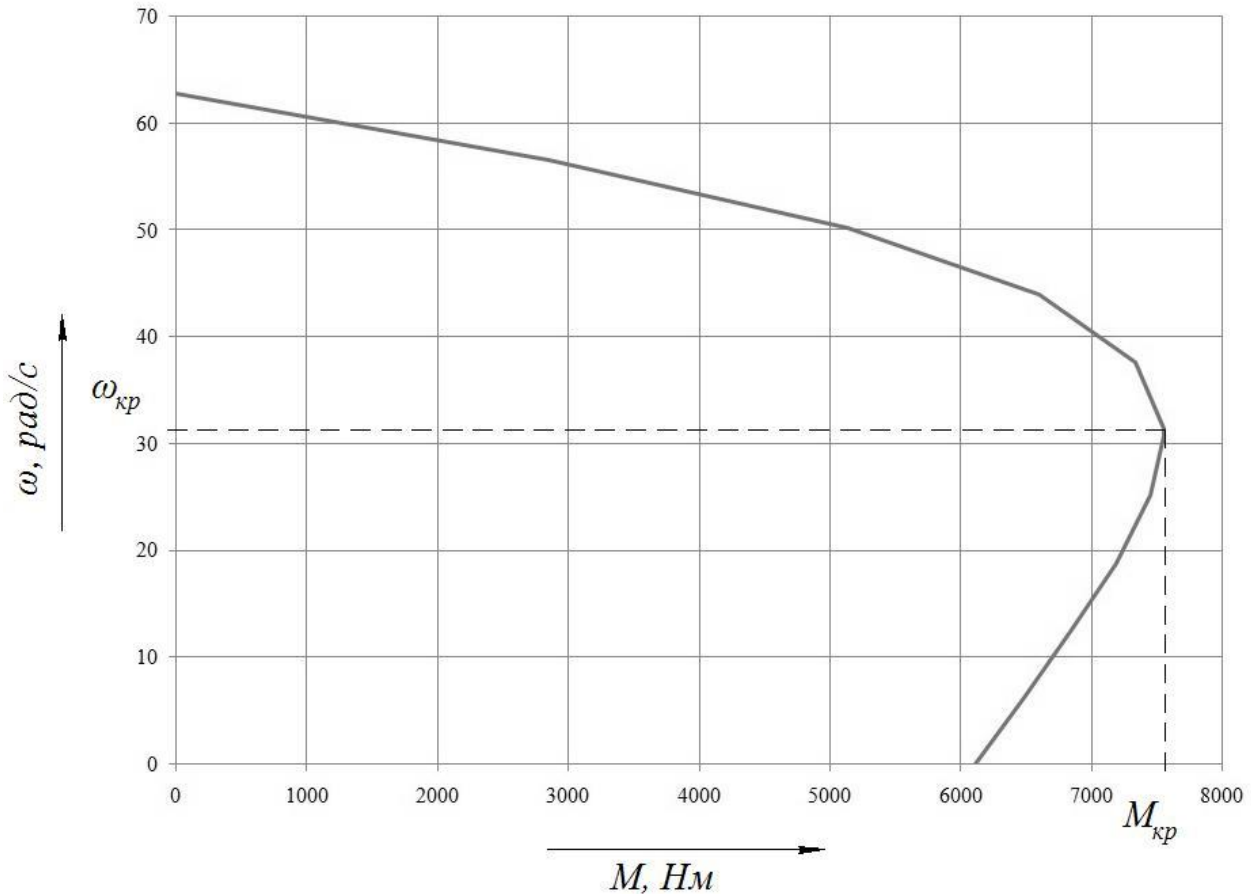


Рис. 3.3. Искусственная механическая характеристика электродвигателя

Задача 3.2

Рассчитать и построить механическую характеристику асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Асинхронный двигатель характеризуется следующими параметрами:

- номинальная мощность на валу $P_n=5,5$ кВт;
- номинальная частота вращения ротора $n_n=2880$ об/мин;
- номинальный КПД $\eta_n=0,875$;
- номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_n=0,91$;
- отношение пускового тока к номинальному $k_m=7,5$;
- отношение максимального момента к номинальному $\lambda=2,2$.

Решение

Номинальная частота вращения ротора электродвигателя в рад/с составляет

$$\omega_n = \frac{2\pi \cdot n_n}{60} = \frac{2\pi \cdot 2880}{60} = 301 \text{ рад/с.}$$

Ближайшее значение частоты вращения магнитного поля статора составляет $\omega_0=314$ рад/с (3000 об/мин).

Номинальное скольжение двигателя

$$s_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0} = \frac{314 - 301}{314} = 0,04.$$

Для расчета механической характеристики двигателя необходимо знать параметры схемы замещения электродвигателя (индуктивное сопротивление в режиме короткого замыкания x_k , активное сопротивление обмоток статора r_1 , приведенное активное сопротивление ротора r'_2), которые определяются следующим образом.

Отношение активного сопротивления статора к приведенному активному сопротивлению ротора

$$a = \frac{r_1}{r'_2} = \frac{a_0}{\xi} \cdot \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \cdot \frac{s_n}{1 - s_n} - 1,$$

где $\xi=1,02 \dots 1,10$ (принимаем $\xi=1,05$); $a_0=0,58 \dots 0,67$ (принимаем $a_0=0,61$).

Получаем

$$a = \frac{r_1}{r'_2} = \frac{0,61}{1,05} \cdot \frac{1 - 0,91}{0,91} \cdot \frac{0,04}{1 - 0,04} - 1 = 0,9918$$

Приведенное активное сопротивление обмотки ротора рассчитывается по формуле

$$r'_2 = \frac{R_m}{G} \cdot \left[\frac{b}{s_n} + a + \sqrt{\left(\frac{b}{s_n} + a \right)^2 - G} \right],$$

где

$$R_m = \frac{3 \cdot U_n^2 \cdot (1 - s_n)}{2 \cdot P_n \cdot (\lambda + \xi - 1)} = \frac{3 \cdot 380^2 \cdot (1 - 0,04)}{2 \cdot 5500 \cdot (2,2 + 1,05 - 1)} = 16,8,$$

$$G = \frac{1}{s_n^2} + \frac{2 \cdot a}{s_n} + a^2 = \frac{1}{0,04^2} + \frac{2 \cdot 0,9918}{0,04} + 0,9918^2 = 675,$$

$$b = \frac{\lambda + \xi - 1}{\xi} = \frac{2,2 + 1,05 - 1}{1,05} = 2,14.$$

Получаем

$$r'_2 = \frac{16,8}{675} \cdot \left[\frac{2,14}{0,04} + 0,9918 + \sqrt{\left(\frac{2,14}{0,04} + 0,9918 \right)^2 - 675} \right] = 2,55 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление обмоток статора определим по формуле

$$r_1 = a \cdot r'_2 = 0,9918 \cdot 2,55 = 2,53 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление двигателя в режиме короткого замыкания

$$x_k = \sqrt{R_m^2 - 2 \cdot R_m \cdot r_1} = \sqrt{16,8^2 - 2 \cdot 16,8 \cdot 2,53} = 14,04 \text{ Ом.}$$

Полученные значения проверим по формулам

$$P_n = \frac{3 \cdot U_n^2 \cdot (1 - s_n) \cdot \frac{r'_2}{s_n}}{\xi \cdot \left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{s_2} \right)^2 + x_k^2 \right]} = \frac{3 \cdot 380^2 \cdot (1 - 0,04) \cdot \frac{2,55}{0,04}}{1,05 \cdot \left[\left(2,53 + \frac{2,55}{0,04} \right)^2 + 14,04^2 \right]} = 5500 \text{ кВт} ,$$

$$\lambda = \frac{3 \cdot U_n^2}{2 \cdot P_n} \cdot \frac{1 - s_n}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2}} + 1 - \xi = \frac{3 \cdot 380^2}{2 \cdot 5500} \cdot \frac{1 - 0,04}{2,53 + \sqrt{2,53^2 + 14,04^2}} + 1 - 1,05 = 2,2 .$$

Полученные значения соответствуют паспортным, значит расчет произведен верно.

Критическое скольжение рассчитаем по формуле

$$s_k = \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} = \frac{2,55}{\sqrt{2,53^2 + 14,04^2}} = 0,18 .$$

Критический момент электродвигателя

$$M_k = \frac{3 \cdot U_n^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left(r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2} \right)} = \frac{3 \cdot 380^2}{2 \cdot 314 \cdot \left(2,53 + \sqrt{2,53^2 + 14,04^2} \right)} = 41,05 \text{ Нм} .$$

Механическая характеристика асинхронного двигателя описывается формулой Клосса. Полная форма которой выглядит следующим образом

$$M = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + a \cdot s_k)}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k} + 2 \cdot a \cdot s_k}$$

Расчет производим для значений скольжения от 0 до 1 с интервалом 0,1. Пересчет частоты вращения ведем по формуле

$$\omega = (1 - s) \cdot \omega_0 .$$

Результаты расчета представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Механическая характеристика асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

| | | | | | | | | | | | | |
|------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| s | 0 | 0,1 | 0,18 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 |
| ω , рад/с | 314 | 283 | 276 | 251 | 220 | 188 | 157 | 126 | 94 | 63 | 31 | 0,0 |
| M , Нм | 0 | 6415 | 7555 | 7514 | 6667 | 5655 | 4816 | 4159 | 3645 | 3236 | 2906 | 2635 |

Построим рассчитанную механическую характеристику (рис.3.4).

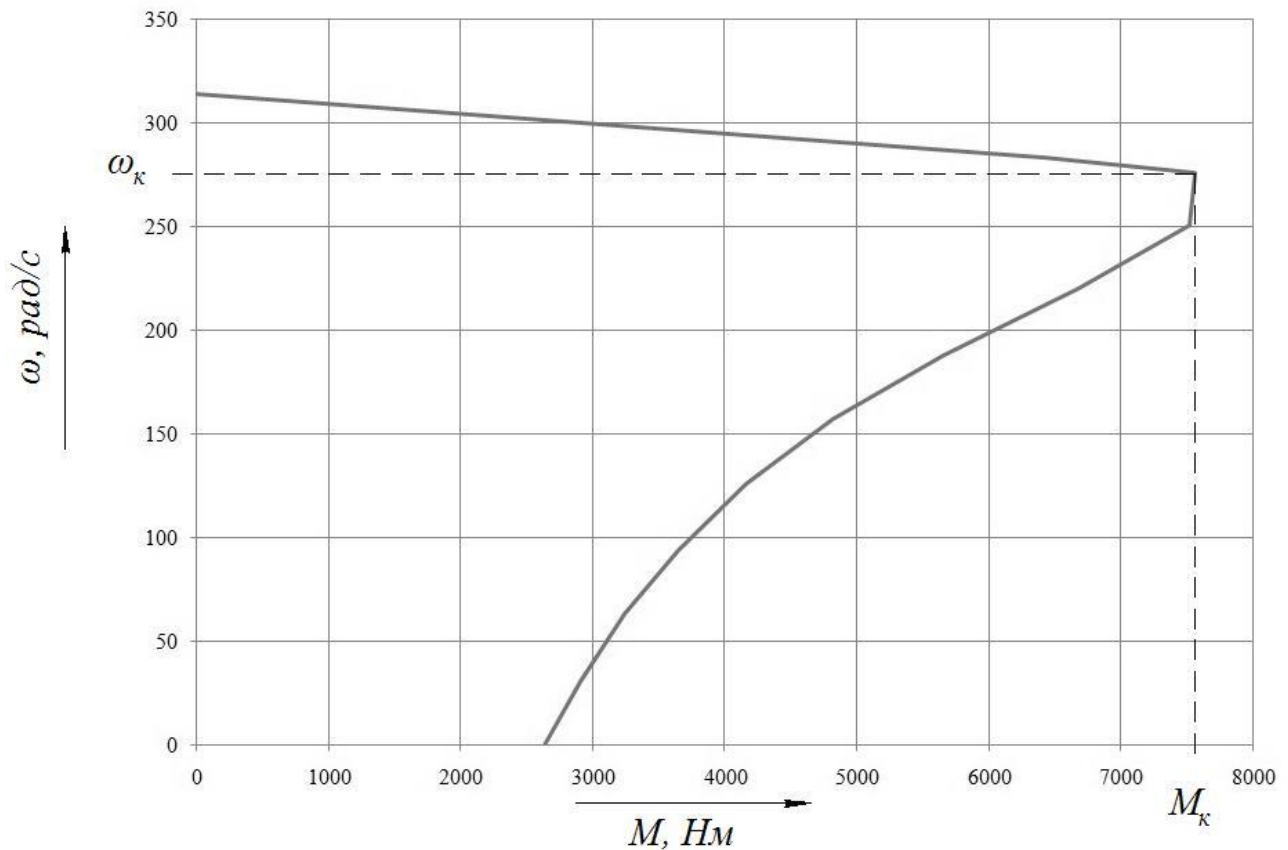


Рис. 3.4. Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

4 ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

4.1 РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электромеханическая характеристика двигателей постоянного тока описывается уравнением

$$\omega = \frac{U - I_a \cdot R_a}{k\Phi},$$

где ω – частота вращения ротора, с^{-1} ; U – напряжение якоря, В; I_a – ток якоря, А; R_a – сопротивление обмоток якоря, Ом; $k\Phi$ – приведенный магнитный поток главных полюсов, В·с.

Исходя из приведенного уравнения регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока возможно тремя способами: изменением поданного на обмотки якоря напряжения, включением в цепь питания двигателя дополнительных сопротивлений, а также изменением магнитного потока главных полюсов двигателя.

Рассмотрим описанные способы на примере двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Его электромеханическая характеристика имеет вид

прямой линии и может быть построена по двум точкам, соответствующим частоте работы двигателя в режиме идеального холостого хода ($\omega=\omega_0, I_a=0$) и режиме короткого замыкания ($\omega=0, I_a=I_{кз}$). Частота вращения в режиме идеального холостого хода и ток короткого замыкания определяются уравнениями

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi};$$

$$I_{кз} = \frac{U}{R_a}.$$

При использовании дополнительных сопротивлений в обмотке ротора схему питания двигателя можно представить в виде рис.4.1.

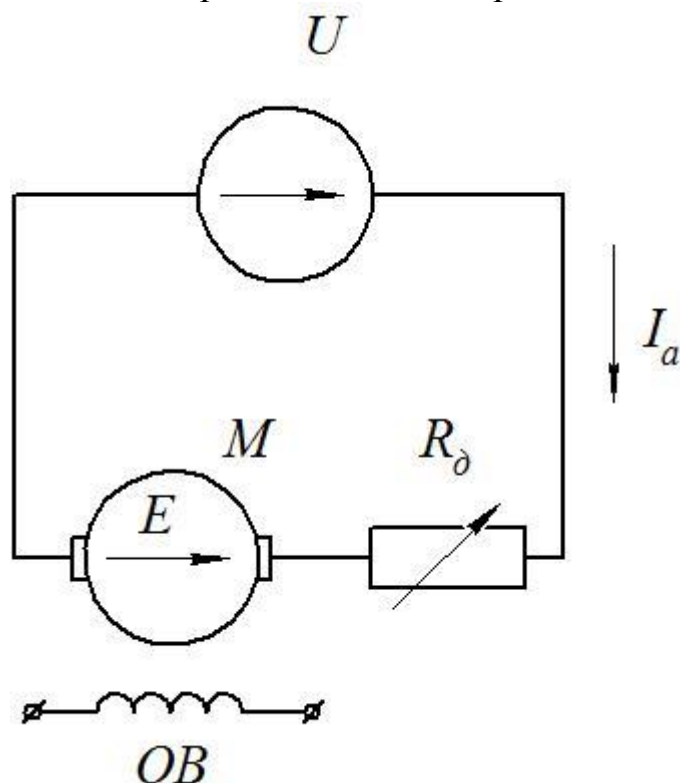


Рис. 4.1.. Схема питания двигателя постоянного тока при реостатном регулировании

Значение ω_0 при этом не изменится, в то же время ток короткого замыкания будет определяться уравнением

$$I_{кзи} = \frac{U}{R_a + R_\delta}.$$

На рис. 4.2 представлены естественные электромеханические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при реостатном регулировании.

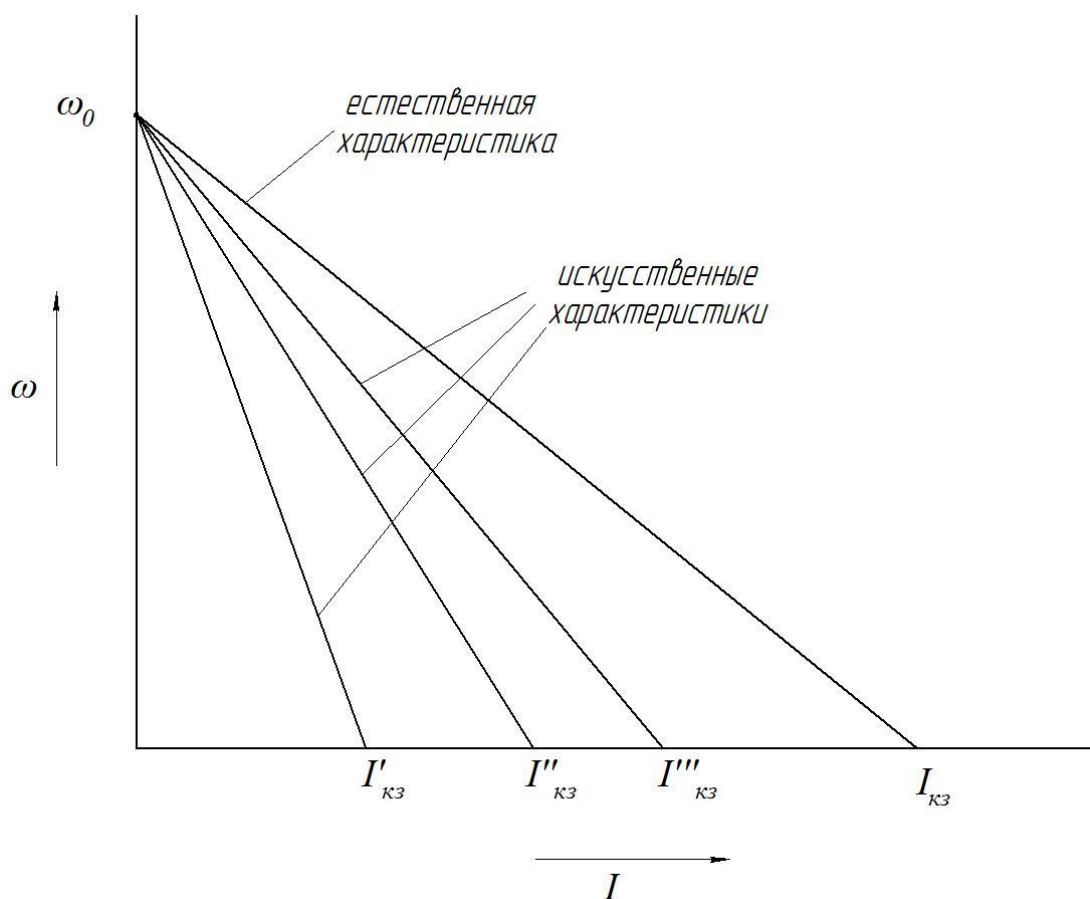


Рис. 4.2. Электромеханические характеристики двигателя постоянного тока при реостатном регулировании.

Изменение магнитного потока главных полюсов производят включением в цепь питания обмотки возбуждения двигателя дополнительного сопротивления (рис. 4.3).

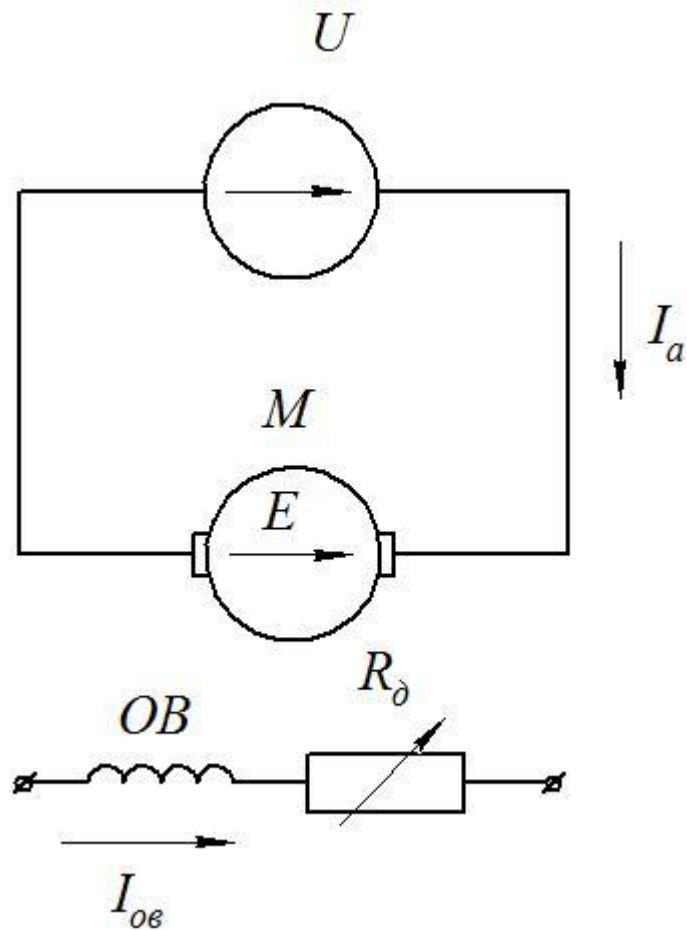


Рис.4.3. Схема питания двигателя постоянного тока независимого возбуждения при регулировании изменением магнитного потока

В этом случае ток короткого замыкания остается постоянным, а частота вращения идеального холостого хода увеличивается при снижении тока в обмотке возбуждения двигателя. Электромеханические характеристики, соответствующие такому регулированию частоты вращения показаны на рис.4.4.

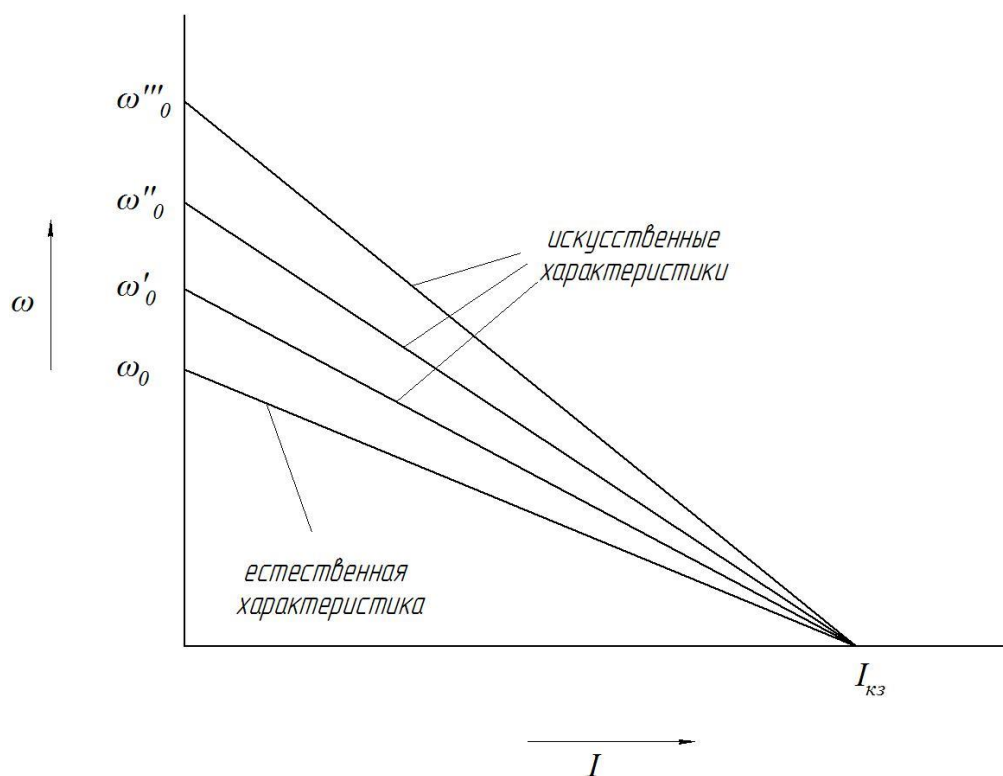


Рис. 4.4. Электромеханические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при изменении магнитного потока

Для изменения приложенного напряжения используют управляемые выпрямители на базе тиристоров или транзисторов. При изменении значения питающего напряжения будут также изменяться значения ω_0 и $I_{кз}$ (рис.4.5). В зависимости от схемы используемого преобразователя электромеханические характеристики двигателя могут располагаться в одном, двух или четырех квадрантах координатной плоскости.

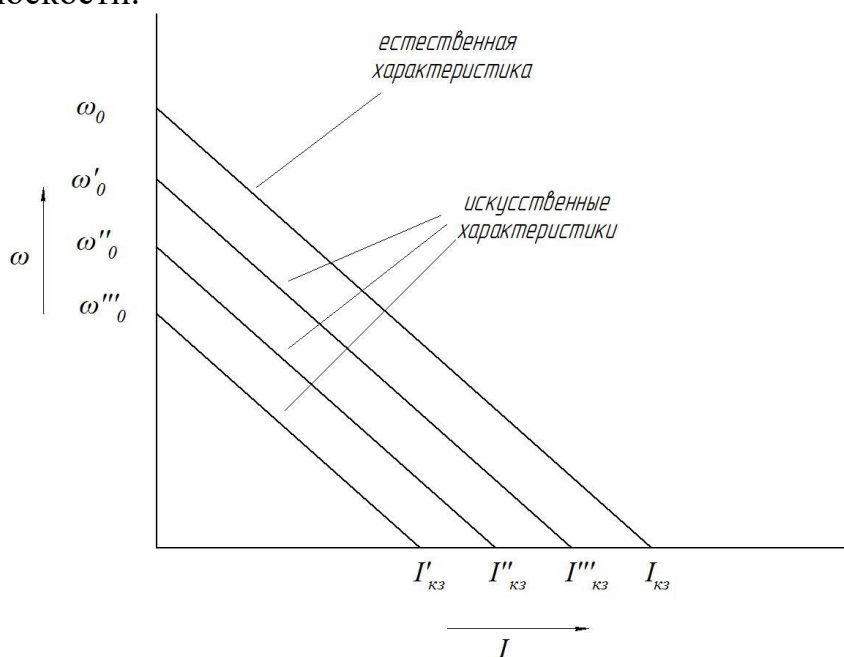


Рис.4.5. Электромеханические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при изменении напряжения

4.2 ЗАДАЧИ ПО РАЗДЕЛУ 4.

Задача 4.1

Двигатель постоянного тока независимого возбуждения характеризуется следующими параметрами:

номинальная мощность на валу двигателя $P_n=0,37$ кВт;

номинальная частота вращения ротора $n_n=1500$ об/мин;

номинальное напряжение на зажимах ротора $U_n=220$ В

номинальный ток в цепи ротора $I_n=2,7$ А;

сопротивления якоря и дополнительных полюсов при 15°C соответственно $R_a=10,61$ Ом и $R_{\text{дп}}=6,66$ Ом;

температура нагрева обмоток двигателя $t_n=85$.

Требуется определить величину сопротивления пускового реостата двигателя постоянного тока независимого возбуждения с учетом поправки на нагрев обмоток. Для работы двигателя в режиме динамического торможения с частотой вращения $\omega_{\text{дт}}=1,5 \omega_n$ и номинальным током ротора определить величину сопротивления тормозного реостата. Для работы двигателя в режиме торможения противовключением с частотой вращения $\omega_n=0,75 \omega_n$ и тока ротора $I_{\text{ан}}=1,5I_n$ определить величину сопротивления тормозного реостата. Для работы двигателя в режиме рекуперативного торможения на естественной механической характеристике при заданном значении тока ротора $I_{\text{аэ}}=0,5I_n$ определить частоту вращения.

Решение

Сопротивление якорной цепи двигателя постоянного тока независимого возбуждения складывается из сопротивления якоря и сопротивления дополнительных полюсов

$$R_{x\Sigma} = R_a + R_{\text{дп}} = 10,61 + 6,66 = 17,3 \text{ Ом.}$$

Сопротивление якорной цепи с учетом температуры нагрева обмоток двигателя определяется как

$$R_{a\Sigma} = R_{x\Sigma} \cdot [1 + \alpha \cdot (t_n - t_x)]$$

где $\alpha=0,004$ $1/^\circ\text{C}$ – температурный коэффициент сопротивления меди; $t_x=15^\circ\text{C}$ – температура, при которой определено значение сопротивления.

Подставляя численные значения, получаем

$$R_{a\Sigma} = 17,3 \cdot [1 + 0,004 \cdot (85 - 15)] = 22,1 \text{ Ом.}$$

Номинальная ЭДС ротора

$$E_n = U_n - I_{\text{ан}} \cdot R_{a\Sigma} = 220 - 2,7 \cdot 22,1 = 163 \text{ В.}$$

Номинальная частота вращения ротора

$$\omega_n = \frac{2\pi \cdot n_n}{60} = \frac{2\pi \cdot 1500}{60} = 157 \text{ рад/с.}$$

Приведенный магнитный поток главных полюсов

$$k\Phi_n = \frac{E_n}{\omega_n} = \frac{163}{157} = 1,04 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}.$$

Номинальный момент на валу двигателя

$$M_n = k\Phi_n \cdot I_n = 1,04 \cdot 2,7 = 2,81 \text{ Нм.}$$

Частота вращения в режиме идеального холостого хода (при I_n)

$$\omega_0 = \frac{U_n}{k\Phi_n} = \frac{220}{1,04} = 211 \text{ рад/с.}$$

Ток ротора в режиме короткого замыкания (пусковой ток на естественной механической характеристике)

$$I_{кз} = \frac{U_n}{R_{a\Sigma}} = \frac{220}{22,1} = 9,95 \text{ А.}$$

Момент на валу двигателя в режиме короткого замыкания

$$M_{кз} = k\Phi_n \cdot I_{кз} = 1,04 \cdot 9,95 = 10,3 \text{ Нм.}$$

По полученным данным строим механическую характеристику двигателя (рисунок 7.5).

Для определения величины сопротивления пускового реостата задаются значениями максимального момента M_1 и момента переключения M_2 .

$$M_1 = (2 \dots 2,5) \cdot M_n,$$

$$M_2 = (1,1 \dots 1,5) \cdot M_n.$$

Принимаем

$$M_1 = 2,2 \cdot M_n = 2,2 \cdot 2,81 = 6,2 \text{ Нм,}$$

$$M_2 = 1,3 \cdot M_n = 1,3 \cdot 2,81 = 3,6$$

По естественной механической характеристике и найденным значениям M_1 и M_2 строят пусковую диаграмму. Построение начинается с нижней линии, соединяющей точки $\omega = \omega_0, M = 0$ и $\omega = 0, M = M_1$. Через пересечение первой искусственной механической характеристики и вертикальной линии, соответствующей значению $M = M_2$, проводится горизонтальная линия до пересечения с вертикальной линии, соответствующей значению $M = M_1$. Через полученную точку строится вторая искусственная механическая характеристика. В итоге получают семейство искусственных механических характеристик. Рекомендуется осуществлять пуск двигателей не более чем в 3 ступени. При превышении этого значения рекомендуется задаться другими значениями M_1 и M_2 и повторить расчет и построение.

Для заданного двигателя и принятых значений M_1 и M_2 после построения получен пуск с одной ступенью пускового реостата (рис. 4.6).

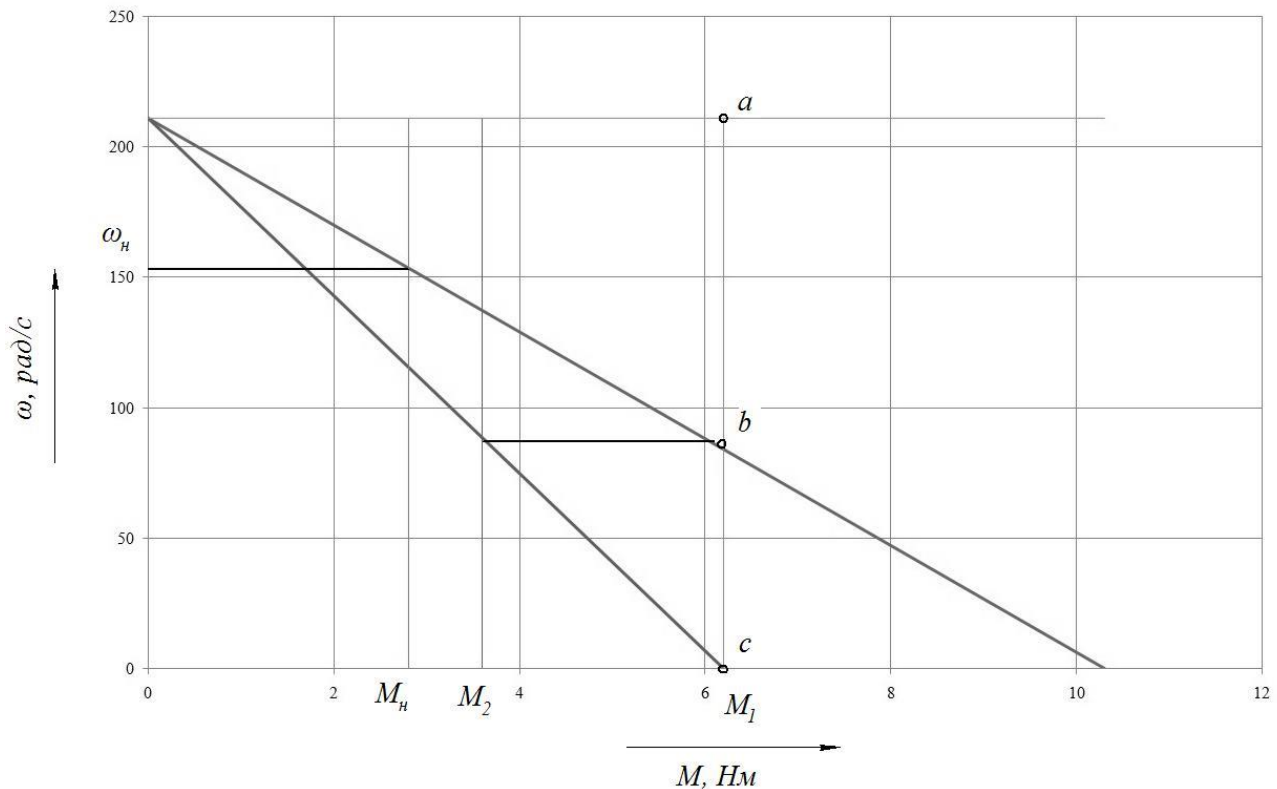


Рис. 4.6. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Сопротивление всей цепи ротора

$$R_1 = \frac{U_n \cdot k\Phi_n}{M_1} = \frac{220 \cdot 1,04}{6,2} = 36,9 \text{ Ом.}$$

Поскольку пуск осуществлен в одну ступень, сопротивление пускового реостата определяется как

$$R_o = R_1 - R_{a\Sigma} = 36,9 - 22,1 = 14,8 \text{ Ом.}$$

В режиме динамического торможения ЭДС в обмотке ротора составляет

$$E_{\partial m} = k\Phi_n \cdot \omega_{\partial m} = 1,04 \cdot 1,5 \cdot 157 = 245 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}.$$

Величина добавочного сопротивления в цепи ротора определяется как

$$R_{\partial m} = \frac{E_{\partial m}}{I_n} - R_{a\Sigma} = \frac{245}{2,7} - 22,1 = 68 \text{ Ом.}$$

Величина добавочного сопротивления в цепи ротора в режиме противовключения определяется из формулы

$$R_n = \frac{\omega_n \cdot k\Phi_n + U_n}{I_{an}} - R_{a\Sigma} = \frac{0,75 \cdot 157 \cdot 1,04 + 220}{1,5 \cdot 2,7} - 22,1 = 62,4 \text{ Ом.}$$

Частота вращения ротора в режиме генераторного торможения при работе на естественной механической характеристике определяется по формуле

$$\omega_n = \frac{U_n + I_{an} \cdot R_{a\Sigma}}{k\Phi_n} = \frac{220 + 0,5 \cdot 2,7 \cdot 22,1}{1,04} = 240 \text{ рад/с.}$$

Задача 4.2

Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения характеризуется следующими параметрами:

номинальная мощность на валу двигателя $P_H=11$ кВт;

номинальный ток двигателя $I_H=60$ А

номинальное напряжение $U_H=220$ В;

номинальная частота вращения $n_H=500$ об/мин.

Требуется построить естественную скоростную характеристику, рассчитать сопротивление пускового реостата и построить пусковые скоростные характеристики.

Для построения естественной скоростной характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения необходимо произвести перерасчет по универсальной скоростной характеристике (таблица 4.1).

Таблица 4.1

Универсальные характеристики двигателя

| | | | | | | | | | |
|-------|-----|------|------|---|------|------|------|------|------|
| $I\%$ | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 |
| $n\%$ | 1,6 | 1,23 | 1,09 | 1 | 0,94 | 0,89 | 0,85 | 0,81 | 0,78 |

Пересчет производится по формулам

$$I = I_H \cdot I\%,$$

$$n = n_H \cdot n\%.$$

Полученные данные заносим в таблицу 4.2.

Таблица 4.2

Естественная и искусственные электромеханические характеристики двигателя.

| | | | | | | | | | |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| I, A | 24 | 36 | 48 | 60 | 72 | 84 | 96 | 108 | 120 |
| $n,$ об/мин | 800 | 615 | 545 | 500 | 470 | 445 | 425 | 405 | 390 |
| $n_{p1},$ об/мин | 682 | 475 | 375 | 299 | 237 | 180 | 126 | 74 | 24 |
| $n_{p2},$ об/мин | 759 | 566 | 485 | 430 | 388 | 352 | 320 | 289 | 262 |

Номинальный КПД двигателя составляет

$$\eta = \frac{1000 \cdot P_H}{U_H \cdot I_H} = \frac{1000 \cdot 11}{220 \cdot 60} = 0,83.$$

Номинальное сопротивление двигателя

$$R_H = \frac{U_H}{I_H} = \frac{220}{60} = 3,7 \text{ Ом}.$$

Сопротивление обмоток ротора

$$R_p = \frac{(1-\eta) \cdot R_H}{2} = \frac{(1-0,83) \cdot 3,7}{2} = 0,31 \text{ Ом}.$$

Сопротивление обмотки возбуждения

$$R_{ос} = \frac{R_p}{2} = \frac{0,31}{2} = 0,155 \text{ Ом.}$$

Суммарное сопротивление обмоток двигателя

$$R_0 = R_p + R_{ос} = 0,31 + 0,155 = 0,465 \text{ Ом.}$$

Для графо-аналитического определения величины пускового реостата необходимо задаться двумя значениями тока двигателя: максимальный пусковой ток I_1 и ток, при котором происходит переключение ступеней пускового реостата, I_2 . Величины тока выбирают в интервалах

$$I_1 = (2...2,2) \cdot I_n,$$

$$I_2 = (1,1...1,4) \cdot I_n.$$

Принимаем

$$I_1 = 2 \cdot I_n = 2 \cdot 60 = 120 \text{ А,}$$

$$I_2 = 1,1 \cdot I_n = 1,1 \cdot 60 = 6,6 \text{ А.}$$

Для принятых значений тока определим значения сопротивления

$$R_1 = \frac{U_H}{I_1} = \frac{220}{120} = 1,8 \text{ Ом,}$$

$$R_2 = \frac{U_H}{I_2} = \frac{220}{66} = 3,3 \text{ Ом.}$$

Определение величины сопротивления пускового реостата производится следующим образом. В первом квадранте рисунка строится естественная скоростная характеристика, рассчитанная ранее. Во втором квадранте откладывают на оси абсцисс значения сопротивлений R_1 , R_2 и R_0 , а также восстанавливают перпендикуляр к оси абсцисс через точку R_0 . На естественной скоростной характеристике отмечают точки, соответствующие значениям тока I_1 и I_2 и проводят горизонтальные линии до пересечения с указанным перпендикуляром в точках a и b . Полученные точки соединяют соответственно с полученными ранее точками R_1 и R_2 . Далее согласно рисунку 4.7 производят построение ломаной линии, по которой определяют величину сопротивлений пускового реостата. При использовании графо-аналитического способа определения сопротивления пускового реостата рекомендуется, чтобы полученное число ступеней было не более 3. При большем числе ступеней пускового реостата рекомендуется задаться другими значениями токов I_1 и I_2 и повторить расчет и построение.

По построенному графику определяем значение пусковых сопротивлений

$$R_{p1} = de = 0,834 \text{ Ом}$$

$$R_{p2} = hb = 0,45 \text{ Ом}$$

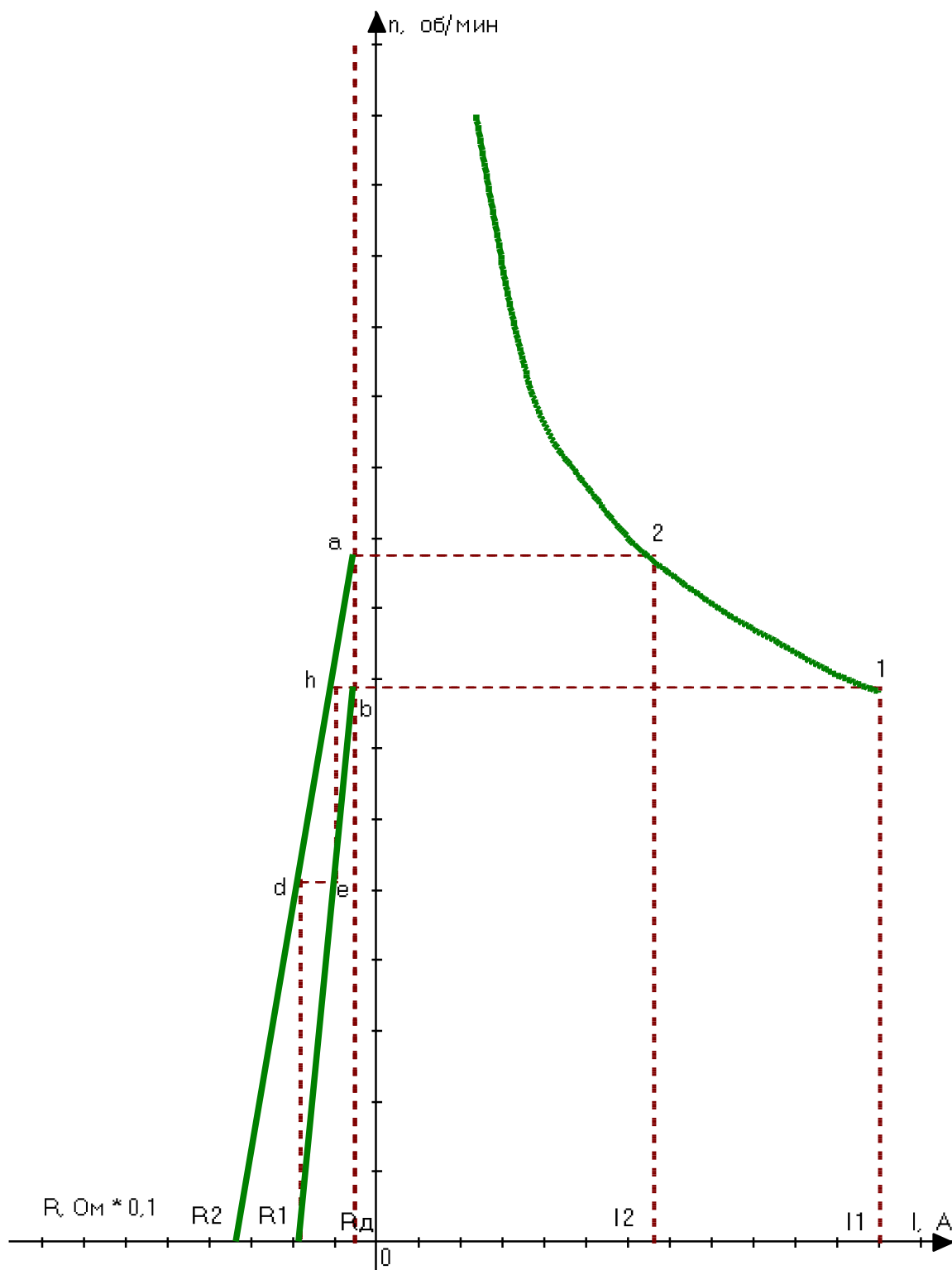


Рис. 4.7. Определение сопротивления пускового реостата двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Полное сопротивление пускового реостата представляет собой сумму сопротивлений отдельных ступеней

$$R_{p\Sigma} = \sum R_p = 0,834 + 0,45 = 1,284 \text{ Ом.}$$

Расчет искусственной скоростной характеристики при включении в цепь двигателя первой ступени пускового реостата производится по формуле

$$n_{n1} = n_e \frac{U_n - I_e(R_\delta + R_{\delta n})}{U_n - I_e \cdot R_\delta} = n_e \frac{220 - I_e(0,465 + 1,284)}{220 - I_e \cdot 0,465} = n_e \frac{220 - I_e \cdot 1,749}{220 - I_e \cdot 0,465}$$

На второй ступени пускового реостата в цепь двигателя включено только сопротивление R_{p2} . Для второй искусственной характеристики получаем

$$n_{n2} = n_e \frac{U_n - I_e(R_\delta + R_{\delta n})}{U_n - I_e \cdot R_\delta} = n_e \frac{220 - I_e(0,465 + 0,45)}{220 - I_e \cdot 0,465} = n_e \frac{220 - I_e \cdot 0,915}{220 - I_e \cdot 0,465}$$

Результаты расчета искусственных характеристик сводим в таблицу 7.5. По рассчитанным значениям строим графики искусственных скоростных характеристик (рис. 4.8).

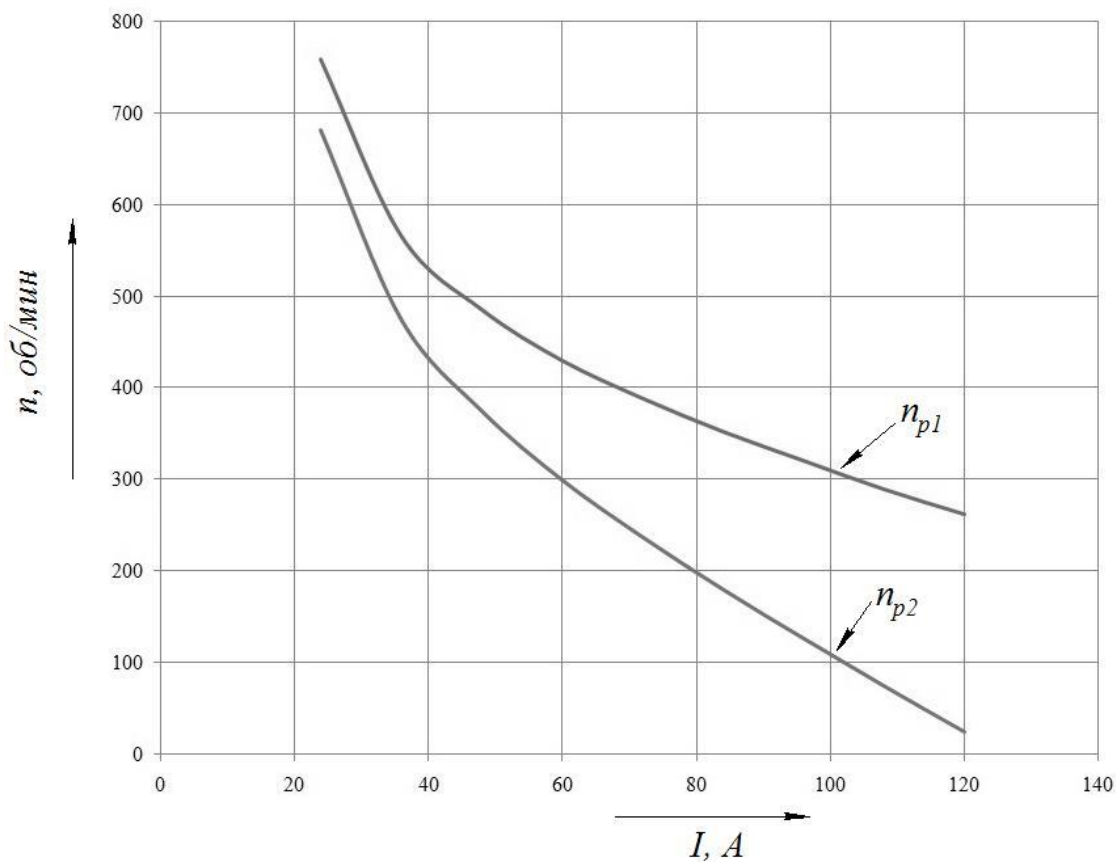


Рис. 4.8. Искусственные скоростные характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем пособии описаны краткие сведения для расчета характеристик и элементов системы электропривода.

В разделе 1 проведен анализ структуры электропривода, приведены формулы для расчета постоянных и переменных потерь в электроприводе постоянного и переменного тока. В разделе 2 выведена формула для определения оптимального по быстродействию электропривода передаточного числа механической передачи, приведен пример расчета приведенного момента сопротивления на валу двигателя лебедки. В разделе 3 описан выбор пусковых сопротивлений для асинхронного двигателя, а также описан расчет угла нагрузки синхронного двигателя, работающего в режиме компенсатора реактивной мощности. Раздел 4 посвящен рассмотрению способов регулирования двигателей постоянного тока и расчету пусковых сопротивлений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Онищенко Г.Б. Электрический привод.: Учебник для вузов. – М.: РАСХН, 2003. – 320с.
- 2 Ильинский Н.Ф. Основы электропривода. Учебник для вузов. – М.: МЭИ, 2003.– 224с.
- 3 Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. Учебник для вузов. – М.: Академия, 2006.– 265с.
- 4 Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. - 6-е изд., доп. и перераб. - М.: Энергоиздат, 1981. - 576 с.

Учебное издание

А.А. Зарифьяном, М.В. Чавычалов, Н.В. Гребенниковым,
А.А. Андриющенко, Т.З. Талахадзе

Методическое обеспечение
для выполнения курсовой работы и самостоятельной работы магистрантов
по дисциплине «Разработка проектных решений изготовления узлов и деталей
подвижного состава»

Печатается в авторской редакции
Технический редактор

Подписано в печать 10.12.15 Формат 60×84/16.
Бумага газетная. Ризография. Усл. печ. л.
Тираж экз. Изд. № 50 Заказ 3,48.

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС.

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, 2.