

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

***АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД
ОТРАСЛИ***

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**к выполнению расчетно-графических и контрольных работ
для студентов специальностей 1-53 01 01-05
«Автоматизация технологических процессов и производств»**

ВИТЕБСК
2011

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

СОГЛАСОВАНО

Зам. председателя редакционно-
издательского совета ВГТУ

_____ **В.В. Пятов**

«_____» _____ 2010 г.

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор

_____ **С.И. Малашенков**

«_____» _____ 2010 г.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ОТРАСЛИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению расчетно-графических
и контрольных работ
для студентов специальностей 1-53 01 01-05
«Автоматизация технологических процессов и производств»

ВИТЕБСК
2011

УДК 621.283.681.51

Автоматизированный электропривод отрасли: методические указания к выполнению расчетно-графических и контрольных работ для студентов специальности 1-53 01 01-05 «Автоматизация технологических процессов и производств».

Витебск: Министерство образования Республики Беларусь, УО «ВГТУ», 2011.

Составители: к.т.н., доц. Попов Ю.В.,
к.т.н., доц. Новиков Ю.В.

Методические указания составлены в соответствии с учебной программой курса «Автоматизированный электропривод отрасли», изучаемого студентами специальностей 1-53 01 01-05. Приведены общие методические указания к выполнению расчетно-графических и контрольных работ, краткие теоретические сведения, примеры решения и многовариантные задачи.

Одобрено кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств» УО "ВГТУ" 14.10.2010 г., протокол № 3

Рецензент: доц. Ильющенко А.В.
Редактор: доц., к.т.н. Иванова Л.В.

Рекомендовано к опубликованию редакционно-издательским советом УО "ВГТУ" «___»_____2011 г., протокол № ____

Ответственный за выпуск: Букин Ю.А.

Учреждение образования "Витебский государственный технологический университет"

Подписано в печать_____. Формат_____. Уч.-изд. лист._____.
Печать ризографическая. Тираж_____экз. Заказ №_____. Цена_____руб.

Отпечатано на ризографе учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».

Лицензия № 02330/0494384 от 16 марта 2009 г.

210035, г. Витебск, Московский пр-т, 72.

1 ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТ

Программой курса предусмотрено выполнение одной расчетно-графической работы для студентов дневного отделения и двух контрольных работ для студентов заочной формы обучения. Содержание расчетно-графической работы и первой контрольной работы совпадают. Поэтому методические указания будут полезны при выполнении обоих видов работ.

К решению задач следует приступить только после изучения соответствующего теоретического материала по курсу. Все расчеты выполнять в системе СИ.

Решения необходимо сопровождать краткими пояснениями. При использовании справочных материалов необходимо называть источник, делая ссылку на перечень литературы, приведенной в конце работы.

Решения следует выполнять сначала в общем виде, затем подставлять числовые величины, при наличии значительных однотипных вычислений приводить два-три расчета в качестве примера, результаты внести в таблицу.

Арифметическая правильность вычислений и указания размерности являются обязательными.

Рисунки следует пронумеровать и снабдить подрисуночными подписями, оси координат снабдить размерными подписями.

Графики и схемы необходимо приводить в контрольной работе по ходу расчета.

Текстовая часть работы должна быть написана аккуратно, четким почерком, на одной стороне листа. Листы должны быть пронумерованы, слова не сокращать.

Если преподаватель предложит переделать какой-либо раздел работы, то в этом случае исправления вносятся в текст с тем расчетом, чтобы исправленная работа представляла единое целое.

Листы с большим числом исправлений следует переписать. Все замененные листы обязательно приложить к исправленной работе. Замечания рецензента не разрешается ни стирать, ни заклеивать.

В конце выполненного контрольного задания студент проставляет дату и подпись.

Расчеты производить в абсолютных единицах.

2 РАБОТА 1. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ КАК ЭЛЕМЕНТА САУ

ЗАДАНИЕ

1. Используя уравнения, описывающие процессы в двигателе постоянного тока в установившемся режиме, получить выражения для статических (механической и электромеханической) характеристик электродвигателя.

2. Для заданного двигателя:

а) рассчитать и построить статические характеристики для следующих случаев:

- при номинальном магнитном потоке ($\Phi = \Phi_{ном}$) и напряжениях на обмотке якоря, равных $U_{я} = U_{ян}, 0,5U_{ян}, 0, -U_{ян}, -0,5U_{ян}$;

- при магнитном потоке $\Phi = \frac{3}{4}\Phi_{н}$ и напряжениях на обмотке якоря, равных $U_{я} = U_{ян}, -U_{ян}$;

б) определить жесткость механических характеристик.

3. Используя выражения, описывающие процессы в двигателе постоянного тока в переходных режимах, получить выражения для передаточных функций электродвигателя при управлении напряжением на обмотке якоря и по возмущающему воздействию.

4. Для заданного двигателя, используя технические данные, определить значения коэффициентов и постоянных времени, входящих в выражения передаточных функций.

5. Используя выражения, описывающие процессы в двигателе постоянного тока в переходных режимах, составить эквивалентную структурную схему электродвигателя, содержащую ток обмотки якоря в качестве промежуточной величины.

3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО ДАННЫМ В КАТАЛОГЕ

1 Рассчитывается номинальная скорость вращения якоря двигателя:

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

где n_n – номинальная частота вращения.

2 Рассчитывается номинальное значение момента нагрузки двигателя:

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

где P_n – номинальная частота вращения.

3 Номинальный ток якоря можно рассчитать, используя формулу для КПД:

$$\eta_n = \frac{P_n}{P_{\text{ПОТР}}} = \frac{P_H}{U_{ЯН} I_{ЯН} = I_{ВН} U_{ВН}},$$

откуда

$$I_{ЯН} = \frac{P_H - \eta_H \cdot I_{ВН} \cdot U_{ВН}}{\eta_H U_{ЯН}} \text{ А},$$

где $I_{ВН}$, $U_{ВН}$ – номинальные значения напряжения и тока обмотки возбуждения.

Номинальный ток обмотки возбуждения

$$I_{ВН} = \frac{U_{ВН}}{k_t R_B} \text{ А},$$

где k_t – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления при нагреве, $k_t = 1,28$. R_B – сопротивление обмотки возбуждения при температуре 15 градусов.

4 Сопротивление якорной цепи

$$K_{ЯЦ} = k_t (R_Я + R_{ДП}) + R_{Щ} \text{ Ом},$$

$R_Я$, $R_{ДП}$ – сопротивление обмоток якоря и дополнительных полюсов при температуре 15 градусов. $R_{Щ}$ – сопротивление щеток:

$$R_{Щ} = \frac{\Delta U_{Щ}}{I_{ЯН}} \approx \frac{2}{1,62} = 1,23 \text{ Ом},$$

где $\Delta U_{щ}$ -падение напряжения в щетках, которое можно принять равным 2–2,7 В.

5 Значение $\kappa \cdot \Phi_H$ двигателя определяют на основании электромеханической характеристики ДПТ:

$$\omega = \frac{U_{я}}{\kappa \cdot \Phi} - \frac{R_{ящ}}{\kappa \cdot \Phi} \cdot I_{я}. \quad (1)$$

где κ – конструктивный коэффициент двигателя, равный

$$\kappa = \frac{P \cdot N}{2\pi \cdot a},$$

где P – число пар полюсов машины;

N – число активных проводников якоря;

a – число пар параллельных ветвей.

Учитывая, что коэффициент κ определить по каталогу не представляется возможным, а в формулах статических характеристик используется произведение $\kappa \cdot \Phi$, то выражение (1) для номинального режима примет вид

$$\omega_H = \frac{U_{яH}}{\kappa \cdot \Phi_H} - \frac{R_{ящ}}{\kappa \cdot \Phi_H} \cdot I_{яH},$$

откуда

$$\kappa \cdot \Phi_H = \frac{U_{яH} - R_{ящ} \cdot I_{яH}}{\omega_H}.$$

4 РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА

К статическим характеристикам привода относятся электромеханическая и механическая характеристики. Первая представляет собой зависимость скорости вращения двигателя от тока в обмотке якоря $\omega = f(I_{\text{я}})$.

Уравнение электромеханической характеристики имеет вид:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{\kappa \cdot \Phi} - \frac{R \cdot I_{\text{я}}}{\kappa \cdot \Phi} . \quad (2)$$

Механическая характеристика электродвигателя представляет собой зависимость скорости вращения ω от момента M .

Уравнение механической характеристики $\omega = f(M)$ имеет вид:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{\kappa \cdot \Phi} - \frac{M \cdot I_{\text{я}}}{(\kappa \cdot \Phi)^2} . \quad (3)$$

R – электрическое сопротивление цепи якоря электродвигателя.

$$R = R_{\text{яц}} + R_{\text{доб}} , \quad (4)$$

где $R_{\text{яц}}$ – сопротивление обмоток в цепи якоря, приведенное к рабочей температуре; $R_{\text{доб}}$ – сопротивление реостата, включенного в цепь якоря электродвигателя.

В режиме идеального холостого хода ток в цепи якоря $I_{\text{я}} = 0$, а следовательно, и момент $M=0$, поэтому скорость вращения в режиме идеального х.х. равна

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{\kappa \cdot \Phi} . \quad (5)$$

Таким образом, уравнения электромеханической и механической характеристик можно привести к виду:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega , \quad (6)$$

где $\Delta\omega$ – изменение скорости вращения, вызванное нагрузкой двигателя. Зависимость $\Delta\omega$ от тока нагрузки определяется выражением

$$\Delta\omega = -\frac{R \cdot I_{\text{я}}}{\kappa \cdot \Phi} , \quad (7)$$

а зависимость $\Delta\omega$ от момента нагрузки имеет вид:

$$\Delta\omega = -\frac{M \cdot R}{(\kappa \cdot \Phi)^2} . \quad (8)$$

Таким образом, как это следует из (6), электромеханическая и механическая характеристики электродвигателя независимого возбуждения представляют собой прямые линии. Выражения (7) и (8) показывают, что изменение скорости вращения электродвигателя, обусловленное изменением его нагрузки, прямо пропорционально электрическому сопротивлению цепи якоря.

Поэтому наименьшему сопротивлению цепи якоря $R = R_{\text{яц}}$ соответствует наименьшее изменение частоты вращения $\Delta\omega$. В этом случае электромеханическая и механическая характеристики электродвигателя являются наиболее жесткими. Такие характеристики называют естественными. Если же в цепь якоря ввести добавочное сопротивление, то влияние нагрузки на величину $\Delta\omega$ становится более значительным, и характеристики электродвигателя становятся мягкими и их угол к оси абсцисс увеличивается. Такие характеристики называют искусственными (реостатными).

Все характеристики электродвигателя независимо от величины сопротивления цепи якоря пересекаются в точке идеального х.х. $\omega = \omega_0$. Объясняется это тем, что при режиме идеального х.х. ток якоря $I_{\text{я}}$ и момент M равны нулю, а поэтому изменение скорости вращения $\omega = 0$.

Как отмечалось, электромеханические и механические характеристики электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения прямолинейны (5). В связи с этим положение любой из этих характеристик определяется двумя точками. Одной из них является точка идеального х.х. с координатами

ω_0 и $I_{\text{я}} = 0$ и $M = 0$, а другой – точка номинальной нагрузки в двигателе (основном) режиме с координатами ω_H и $I_{\text{яH}}$ и M_H . Если в цепи якоря нет добавочного сопротивления ω_0 и $I_{\text{я}} = 0$ и $R = R_{\text{яц}}$, то координаты точки номинальной нагрузки определяются паспортными данными электродвигателя. Если же в цепь якоря включено добавочное сопротивление $R = R_{\text{яц}} + R_{\text{доб}}$, то при номинальном токе якоря и $I_{\text{яH}}$ скорость вращения

$$\omega'_{\text{ном}} = \omega_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{я.ном}}(R_{\text{яц}} + R_{\text{доб}})}{U_{\text{ном}} - I_{\text{я.ном}}R_{\text{яц}}} \quad (9)$$

Для двигателей постоянного тока независимого возбуждения возможны следующие режимы работы:

- а) двигательный;
- б) режим рекуперативного торможения с отдачей энергии в сеть;
- в) режим торможения противовключением;
- г) режим динамического торможения.

Генераторное торможение с отдачей энергии в сеть (рекуперативное) наступит при скорости вращения якоря, превышающей скорость вращения идеального х.х., т.е. при $\omega > \omega_0$. В этом случае ЭДС якоря $E_{\text{я}}$ становится больше напряжения сети и ток якоря изменяет свое направление (по сравнению с направлением в двигательном режиме), т. е. становится отрицательным:

$$I_{\text{я}} = \frac{E_{\text{я}} - U}{R} \quad (10)$$

В связи с изменением направления тока якоря меняет свое направление электромагнитный момент электродвигателя и становится тормозящим. Характеристики электродвигателя в этом режиме, являясь продолжением характеристик в двигательном режиме, располагаются во втором квадранте осей координат. Уравнение характеристик в тормозном генера-

торном режиме имеет вид аналогичный (6), но величина $\Delta\omega$ в этом случае приобретает отрицательный знак (7) и (8):

$$\omega = \omega_o - (-\Delta\omega) = \omega_o + \Delta\omega. \quad (11)$$

Действие тормозного генераторного момента прекращается, как только скорость вращения якоря, уменьшаясь, достигает скорости вращения идеального х.х.

Торможение противовключением происходит в том случае, когда обмотки электродвигателя включены для одного направления вращения якоря, а под действием каких-либо внешних причин якорь вращается в противоположную сторону. Например, если электродвигатель включен для вращения барабана, на который наматывается трос с грузом, но величина этого груза настолько велика, что под действием его силы тяжести груз опускается. При этом барабан вращается встречно электромагнитному моменту, который в этих условиях становится тормозящим.

Такой же режим торможения противовключением наблюдается тогда, когда для быстрой остановки якоря электродвигателя переключают провода, присоединяемые к выводу обмотки якоря, т. е. изменяют направление тока в обмотке якоря.

Поскольку в режиме торможения противовключением вращение якоря происходит в сторону, противоположную по сравнению с вращением в двигательном режиме, то ЭДС якоря меняет свое направление и действует согласно с приложенным к цепи якоря напряжением. В этих условиях ток якоря

$$I_{\text{я}} = \frac{U + E_{\text{я}}}{R}, \quad (12)$$

т. е. ток якоря в режиме торможения противовключением больше, чем в двигательном режиме. Чтобы ограничить ток якоря до значения $I_{\text{я}} \leq 2,5I_{\text{ян}}$, в цепь якоря на время торможения включают добавочный реостат.

Торможение двигателя происходит до полной остановки якоря $\omega = 0$. Если же в этот момент электродвигатель не отключить от сети, то произойдет реверс двигателя, т. е. начнется его вращение в противоположную сторону. При этом электромагнитный момент электродвигателя вновь станет вращающим.

Характеристики электродвигателя в режиме торможения противовключением располагаются в четвертом квадранте осей координат и являются продолжением характеристик двигательного режима.

Динамическое торможение электродвигателя наступает при отключении обмотки якоря от сети и замыкании ее на реостат сопротивлением R_T . Обмотка возбуждения при этом остается по-прежнему подключенной к сети. Якорь электродвигателя продолжает вращение за счет сил инерции, т. е. за счет кинетической энергии, запасенной во вращающихся частях системы электропривода. В режиме динамического торможения электродвигатель переходит в генераторный режим, но энергия, вырабатываемая при этом, не отдается в сеть, как это имело место в режиме рекуперативного торможения, а преобразуется в тепловую энергию, выделяясь в элементах цепи с сопротивлением $R = R_{яц} + R_T$.

В режиме динамического торможения ЭДС якоря не изменяет своего направления по сравнению с двигательным режимом, но так как напряжение $U_{я} = 0$, то ток якоря, изменив свое направление, действует согласно с ЭДС якоря (а не против ЭДС, как это происходит в двигательном режиме). Другими словами, ток якоря в режиме динамического торможения имеет отрицательное направление. В этом режиме ток якоря

$$I_{я} = \frac{-E_{я}}{R}, \quad (13)$$

где $R = R_{яц} + R_T$;

тормозной момент:

$$-M = \frac{K^2 \cdot \Phi_H^2 \cdot \omega}{R}, \quad (14)$$

т. е. так же, как и ток якоря, отрицательный.

Из выражения (14) следует, что торможение якоря происходит до полной остановки якоря, т. е. до $\omega = 0$.

Характеристики электродвигателя в режиме динамического торможения выходят из начала координат и располагаются во втором и четвертом квадрантах. С увеличением сопротивления R_T жесткость этих характеристик уменьшается. Уравнение характеристик в режиме динамического торможения получают из (6). Но так как в этом режиме электродвигатель отключен от сети ($U = 0$), то $\omega = 0$, поэтому уравнение принимает вид

$$\omega = -\Delta\omega.$$

При расчете $\Delta\omega$ по (6) или (7) ток якоря принимают отрицательным, поэтому величина $\Delta\omega$ становится отрицательной и с учетом знака «минус» уравнение (14) примет вид $\omega = \Delta\omega$.

Так как у двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением магнитный поток зависит от тока якоря, то рассматриваемые зависимости нелинейны. Статические характеристики рассчитываются и строятся по точкам. Основой для расчетов служит естественная электрохимическая характеристика $\omega_E = f(I_E)$, которая приводится в каталогах или справочниках в абсолютных или относительных единицах (так называемые универсальные характеристики).

Ось токов естественной электрохимической характеристики разбивается на ряд участков (примерно 10–15). Для каждого значения тока $I_{яЕ}$ естественной электрохимической характеристики определяют

$$(K\Phi)_E = \frac{U - I_{яЕ} \cdot R_{яц}}{\omega_E} = \left(\frac{E}{\omega}\right)_E. \quad (15)$$

Рассчитывают для этого тока электромагнитный момент на естественной характеристике:

$$M_E = (K\Phi)_E \cdot I_{яЕ} = \left(\frac{E}{\omega}\right)_E \cdot I_{яЕ}. \quad (16)$$

По этим результатам строят естественную механическую характеристику $\omega_E = f(M)$.

5 ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ ДВИГАТЕЛЯ ПО УПРАВЛЯЮЩЕМУ И ВОЗМУЩАЮЩЕМУ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Используя уравнения, описывающие процессы в двигателе постоянного тока с независимым возбуждением в переходных режимах, получим выражения для передаточных функций двигателя при управлении напряжением на обмотке якоря и по возмущающему воздействию.

Работа ДПТ в переходном режиме описывается следующими уравнениями:

$$u_{\text{я}} = R_{\text{яц}} \cdot i_{\text{я}} + e + L_{\text{яц}} \frac{di_{\text{я}}}{dt},$$

$$M - M_{\text{с}} = J \frac{d\omega}{dt},$$

$$M = K\Phi \cdot i_{\text{я}},$$

$$e = K\Phi \cdot \omega,$$

где $L_{\text{яц}}$ – индуктивность якорной цепи,

M – вращающий момент электродвигателя,

$M_{\text{с}}$ – момент сопротивления на валу двигателя,

J – момент инерции.

Принимая в качестве входной (управляющей) величины напряжение на якоре $u_{\text{я}}$, в качестве выходной – угловую скорость двигателя ω , возмущающее воздействие $M_{\text{с}}$, решая эти уравнения совместно, получим:

$$T_{\text{я}} T_{\text{м}} \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_{\text{м}} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{U_{\text{я}}}{K\Phi} - \frac{K_{\text{яц}}}{(K\Phi)^2} \cdot (T_{\text{я}} \cdot \frac{dM_{\text{с}}}{dt} + M_{\text{с}}), \quad (17)$$

где $T_{\text{я}}$ – электромагнитная постоянная:

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{яц}}}{R_{\text{яц}}},$$

$T_{\text{м}}$ – электромагнитная постоянная:

$$T_M = J \cdot \frac{R_{яц}}{(K\Phi)^2}.$$

Полученное уравнение в операторном виде примет вид

$$T_я T_M p^2 \omega(p) + T_M p \omega(p) + \omega(p) = \frac{U_я(p)}{K\Phi} - \frac{R_{яц}}{(K\Phi)^2} \cdot (T_я \cdot p \cdot M_c(p) + M_c(p)). \quad (18)$$

Принимая $M_c(p) = 0$, из полученного выражения находим передаточную функцию двигателя по управляющему воздействию

$$\omega'_{ном} = \omega_{ном} \frac{\frac{U_{ном} - I_{я.ном} (R_{яц} + R_{доб})}{U_{ном} - I_{я.ном} R_{яц}} \cdot \frac{K_D}{T_M p + 1}}, \quad (19)$$

где K_D – коэффициент передачи электродвигателя $K_D = \frac{1}{K\Phi}$.

Если величина электромагнитной постоянной мала ($T_я \approx 0$), тогда $T_я$ можно пренебречь и получить упрощенную передаточную функцию двигателя:

$$W_\omega(p) = \frac{\omega(p)}{u_я(p)} = \frac{K_D}{T_M p + 1}. \quad (20)$$

В ряде случаев выходной величиной может являться не скорость двигателя, а угол поворота вала. Тогда, учитывая $\omega(t) = \frac{d\Theta(t)}{dt}$ или в изображениях

$\omega(p) = p\Theta(p)$, откуда $\Theta(p) = \frac{\omega(p)}{p}$, получаем передаточную функцию двигателя по управляющему воздействию, когда выходной величиной является угол поворота

$$W_\Theta(p) = \frac{\Theta(p)}{u_я(p)} = \frac{K_D}{p \cdot (T_я T_M p^2 + T_M p + 1)}. \quad (21)$$

Для определения передаточной функции ДПТ по возмущающему воздействию принимаем в выражении (22) $U_{\text{я}}(p) = 0$, получаем

$$W_M(p) = \frac{\Delta\omega(p)}{M_C(p)} = -\frac{K_D(T_M p + 1)}{T_{\text{я}}T_M p^2 + T_M p + 1}, \quad (22)$$

где K_{DM} – коэффициент передачи ДПТ по возмущению:

$$K_{DM} = \frac{R_{\text{яц}}}{(K\Phi)^2},$$

$\Delta\omega(p)$ – изображение изменения скорости под воздействием возмущающего воздействия.

Знак минус в выражении (22) означает, что с увеличением возмущающего воздействия выходная величина (скорость) уменьшается.

6 РАЗРАБОТКА ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ ДВИГАТЕЛЯ

Из выражения (24) следует что при анализе динамики электропривода по управляющему воздействию на эквивалентной структурной схеме двигатель может быть представлен в следующем виде:

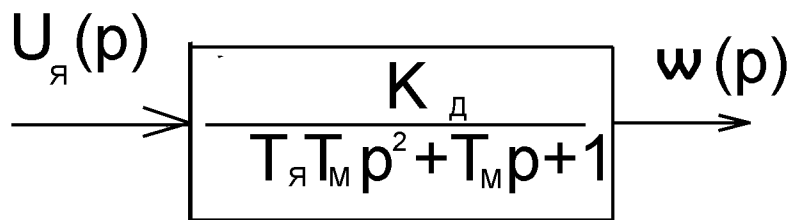


Рисунок 1 – Эквивалентная структурная схема двигателя

Т. е. он является динамическим звеном второго порядка. Из курса ТАУ известно, что если $4T_{\text{я}} > T_M$, то это будет колебательное звено, а при условии $4T_{\text{я}} < T_M$ – апериодическое второго порядка.

В реальных замкнутых системах электропривода для улучшения их свойств применяются обратные связи по току в обмотке якоря, вращающему моменту. В этом случае для анализа динамики схема рисунка 1 непригодна, т. к. в ней отсутствует ток в обмотке якоря и вращающий момент. Необходимы более развернутые схемы.

Для получения схемы, где в качестве промежуточной величины присутствует изображение тока в обмотке якоря, воспользуемся выражениями, записанными в операторной форме:

$$U_{я}(p) = R_{яц}(1 + T_{я} \cdot p) - I_{я}(p) + E(p),$$

Откуда следует

$$I_{я}(p) = [u_{я}(p) - E(p)] \frac{1}{1 + T_{я} \cdot p} \cdot \frac{R_{яц}}{R_{яц}},$$

$$M(p) - M_c(p) = IP\omega(p).$$

Находим

$$\omega(p) = \frac{M(p) - M_c(p)}{IP}. \quad (23)$$

Учитывая, что

$$M(p) = K\Phi \cdot I(p) = \frac{I(p)}{K_d},$$

выражение (23) может быть преобразовано к виду

$$\omega(p) = [I_{я}(p) - I_c(p)] \frac{R_{яц} \cdot K_d}{T_M \cdot p}, \quad (24)$$

где $I_c(p)$ – изображение расчетного тока, соответствующего моменту M_c .

$$I_c(p) = M_c(p) \cdot K_d. \quad (25)$$

Используя выражения (23), (24), (25) и учитывая, что

$$E(p) = K\Phi\omega(p) = \frac{\omega(p)}{K_d},$$

изображаем эквивалентную структурную схему (рис. 2), в которой присутствует изображение тока в обмотке якоря.

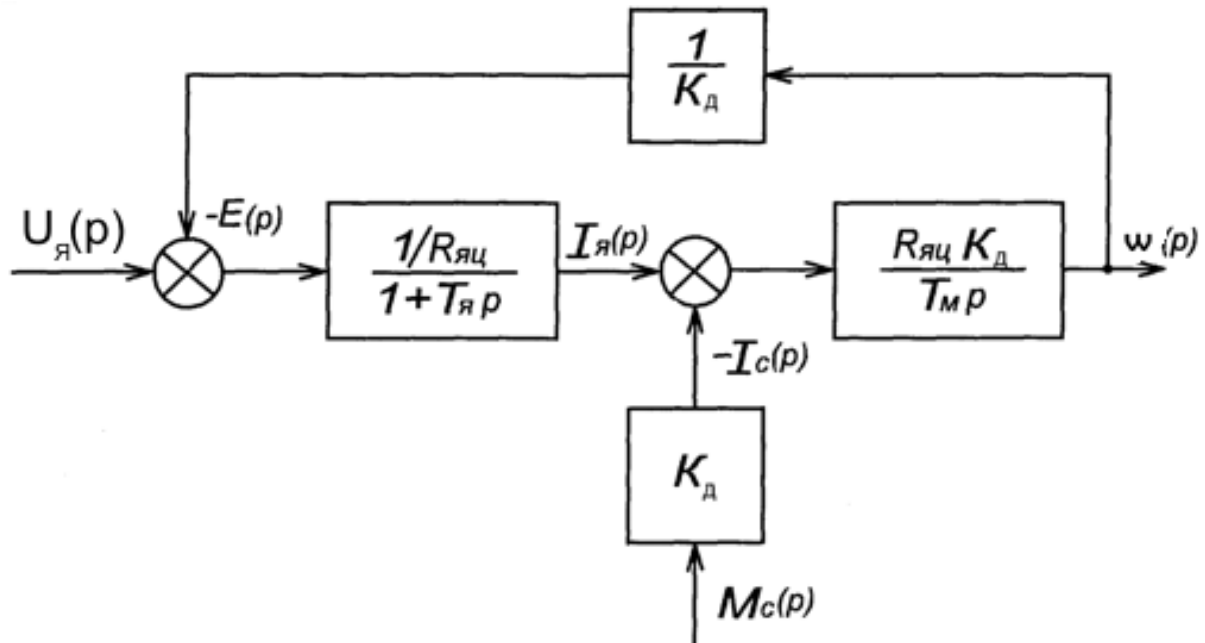


Рисунок 2 – Эквивалентная структурная схема электродвигателя с током якоря в качестве промежуточной величины

От этой схемы легко перейти к эквивалентной схеме, где в качестве промежуточной величины используется вращающий момент.

Учитывая, что

$$M(p) = \frac{I_я(p)}{K_d},$$

и произведя эквивалентные преобразования в схеме на рисунке 2, получим эквивалентную структурную схему, где в качестве промежуточной величины используется изображение вращающего момента (рис. 3).

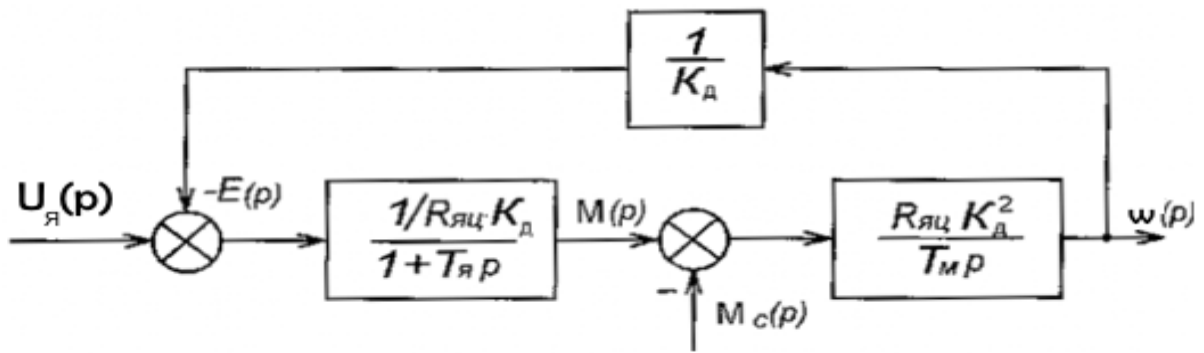


Рисунок 3 – Эквивалентная структурная схема электродвигателя с вращающимся моментом в качестве промежуточной величины

7 РАБОТА 2. РАЗРАБОТКА СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДИСКРЕТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

ЗАДАНИЕ

1. Разработать схему автоматического управления электропривода постоянного тока, обеспечивающую пуск двигателя и динамическое торможение при отключении в функции времени.
2. Дать подробное описание работы схемы.
3. Для заданного двигателя рассчитать значения сопротивлений секций пускового и тормозного реостатов.
4. Определить необходимые выдержки всех реле времени.

Примечание: при пуске и торможении момент сопротивления принять постоянным и равным номинальному, а момент инерции электропривода равным удвоенному моменту инерции двигателя.

5. Объяснить, какие изменения произойдут в работе разработанной схемы автоматического управления, если значения момента сопротивления и момента инерции будут отличаться от значений, принятых при расчете.

8 ПРИНЦИПЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПУСКОМ И ТОРМОЖЕНИЕМ ДВИГАТЕЛЕЙ

Для привода в движение рабочих машин и механизмов, не требующих регулирования скорости, используют электроприводы с релейной системой управления. В таких системах электродвигатель получает питание непосредственно от сети. В число основных задач системы управления входит пуск и останов двигателя, осуществление торможения и реверса, защита от перегрузок и коротких замыканий.

При этом следует обратить внимание на то, что для двигателей постоянного тока прямое подключение к сети недопустимо, т. к. при этом возникают очень большие пусковые токи, опасные для двигателя и питающей сети. Для уменьшения пускового тока при пуске в цепь якоря двигателя включают пусковой реостат. Для сохранения необходимого значения тока и момента по мере разгона двигателя сопротивление пускового реостата постепенно ступенями уменьшают до нуля. Автоматическое управление пуском осуществляют в функции времени, скорости двигателя или величины тока якоря, т. к. эти величины в моменты переключения пускового реостата принимают определенные, заранее рассчитанные значения и достаточно просто поддаются измерению.

При этом в первом случае ведется отсчет времени, для чего используются реле времени. Во втором случае контролируется величина скорости двигателя или ЭДС якоря, что может быть сделано при помощи датчиков скорости или реле напряжения, катушки которых подключаются на зажимы якоря двигателя. В третьем случае используются датчики, дающие командный импульс при снижении минимального тока якоря в процессе пуска до минимального значения. При этом датчиками тока служат реле тока, настраиваемые на минимальный ток.

Управление торможением также может производиться по принципам времени скорости и тока с использованием тех же средств управления, что и при пуске. Окончание процесса торможения фиксируется соответственно:

- после выдержки времени, соответствующей времени останова;
- при снижении скорости до нуля;
- при снижении тока до значения, равного нулю.

9 РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПУСКОВЫХ И ТОРМОЗНЫХ РЕОСТАТОВ И УСТАВОК РЕЛЕ УПРАВЛЕНИЯ

Расчет сопротивлений пусковых и тормозных ступеней реостатов производят в предположении, что механические характеристики двигателя линейны.

Расчет производится в следующем порядке:

1. Определяется относительное сопротивление якорной цепи двигателя:

$$r_{яц} = \frac{R_{яц}}{R_H},$$

где $R_{яц}$ – сопротивление якорной цепи двигателя,

$R_{яц}$ – номинальное сопротивление двигателя, равное

$$R_H = \frac{U_{ян}}{I_{ян}},$$

где $U_{ян}$, $I_{ян}$ – номинальные напряжение и ток якоря.

2. Вычисляется кратность максимального пускового момента (тока) по отношению к номинальному моменту (току) двигателя:

$$m_1 = \frac{M_{\max}}{M_H} = \frac{I_{\max}}{I_{ян}}.$$

3. Определяется отношение максимального пускового момента (тока) к минимальному моменту (току):

$$m_2' = \frac{M_{\max}}{M_{\min}} = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}.$$

4. Рассчитывается кратность начального тормозного момента (тока) по отношению к номинальному моменту (току) двигателя:

$$m_3 = \frac{M_T}{M_H} = \frac{I_T}{I_{ЯН}}.$$

5. Задавшись числом пусковых ступеней K , величиной m_1 и зная $r_{ЯЦ}$, предварительно найдем величину m_2 , равную отношению максимального пускового момента (тока), к максимальному моменту (току) двигателя при данном числе пусковых ступеней:

$$m_2 = \frac{1}{\sqrt[K]{r_{ЯЦ} \cdot m_1}}.$$

При этом должно выполняться условие $m_2 \leq m_2'$.

В противном случае нужно увеличить число ступеней. Если m_2 значительно меньше m_2' , то число ступеней уменьшается.

6. Тогда сопротивление i -ой пусковой ступени будет равно:

$$R_i = r_{ЯЦ} \cdot R_H (m_2 - 1) m_2^{(K-i)},$$

где $i = 1, 2, \dots, K$ – номер ступени.

Сопротивление реостата динамического торможения для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при торможении со скорости холостого хода:

$$R_{\partial m} = \frac{R_H}{m_3} - R_{ЯЦ}.$$

Наладка схемы управления облегчается, если предварительно определить расчетные значения установок реле управления и настроить реле на эти установки. Знание величины выдержек времени необходимо, в частности, для выбора типа реле времени при составлении схемы управления и подборе аппаратуры.

Время разбега на i -ой ступени пуска в случае прямолинейных механических характеристик двигателя может быть определено по формуле

$$\Delta t_i = J \frac{\omega_o}{M_H m_1 m_2^{(i-1)}} \ln \frac{m_2(m_1 - m_c)}{m_1 - m_2 m_c},$$

$$\text{где } m_c = \frac{M_c}{M_H},$$

M_c – момент нагрузки,

J – момент инерции привода, приведенный к валу двигателя.

Время динамического торможения при $\omega_{нач} \approx \omega_0$:

$$t_{\partial t} = J \frac{\omega_o}{M_H m_3} \ln \frac{m_3 + m_c}{m_c}.$$

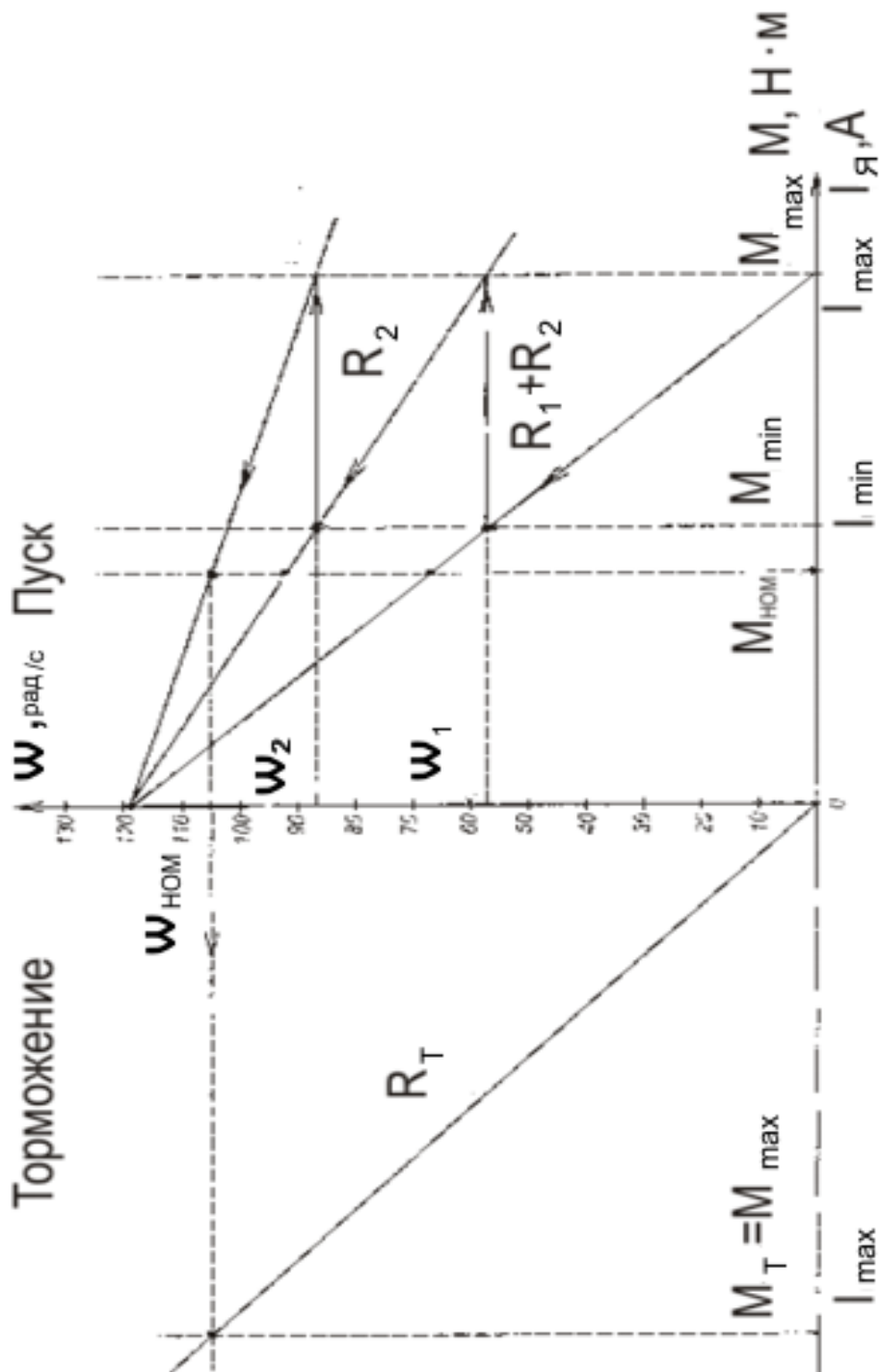
Расчет сопротивлений пусковых и тормозных ступеней реостатов и задержек реле времени более наглядно можно произвести, воспользовавшись предварительно построенными механическими и электромеханическими характеристиками при пуске и торможении двигателя (рисунок 4).

В этом случае сопротивление пусковых ступеней реостата определяется по формуле

$$R_i = \frac{\omega_{кон i} - \omega_{нач i}}{I_{\max} - I_{\min}} K \Phi_H - R_{яц},$$

где $\omega_{кон i}, \omega_{нач i}$ – начальные и конечные значения скорости на данной ступени.

При пуске в две ступени



$$R_1 = \frac{\omega_1 - 0}{I_{\max} - I_{\min}} K\Phi_H - R_{\text{яц}} ,$$

Рисунок 4 – Механические и электромеханические характеристики при пуске и торможении двигателя

$$R_2 = \frac{\omega_1 - \omega_2}{I_{\max} - I_{\min}} K\Phi_H - R_{ЯЦ}.$$

При торможении

$$R_T = \frac{\omega_H}{I_{\max}} K\Phi_H - R_{ЯЦ}.$$

Выдержки реле времени при пуске двигателя могут быть рассчитаны по формуле, получаемой из уравнения движения привода:

$$\Delta t_i = J \frac{\omega_{КОИi} - \omega_{НАЧi}}{M_{\max} - M_{\min 1}} \ln \frac{M_{\max} - M_C}{M_{\min} - M_C}.$$

При пуске в две ступени

$$\Delta t_1 = J \frac{\omega_1 - 0}{M_{\max} - M_{\min 1}} \ln \frac{M_{\max} - M_C}{M_{\min} - M_C},$$

$$\Delta t_2 = J \frac{\omega_2 - \omega_1}{M_{\max} - M_{\min 1}} \ln \frac{M_{\max} - M_C}{M_{\min} - M_C}.$$

Время динамического торможения двигателя

$$\Delta t_T = \frac{J}{|\beta_T|} \ln \frac{|\beta_T| U_{ЯН} + M_C}{M_C},$$

где $|\beta_T|$ – жесткость механической характеристики при торможении:

$$|\beta_T| = \frac{(K\Phi_H)^2}{R_{яц} + R_T} .$$

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Технические данные электродвигателей серии 2П

№ вари- анта	Тип элек- тродвигателя	Номинальное значение		Частота враще- ния, об/мин		КПД %	Сопротивление при 15°С, Ом	
		Мощ- ность, кВт	Напря- жение	Номи- нальная	Макси- маль- ная		Якоря	Допол- нитель- ных по- люсов
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2П-132	1,9	220	1060	3000	76,5	1,08	0,915
2	2П4М32М	2,0	220	750	2500	67,0	1,693	1,26
3	2ПН-100М	2,0	220	3000	4000	79,0	0,805	0,57
4	2ПБ-160М	2,1	220	750	2500	76,5	0,99	0,72
5	2ПН-100	2,2	220	3150	4000	81,0	0,52	0,51
6	2ПБ-132М	2,4	220	1600	4000	77,0	0,74	0,486
7	2ПБ-160М	2,5	220	1000	3000	80,0	0,59	0,43
8	2ПБ-160	2,5	220	800	2500	79,5	0,609	0,526
9	2ПМ-112М	2,5	220	2200	4000	76,0	0,788	0,682
10	2ПФ-132	2,8	220	750	2500	67,0	1,08	0,915
11	2ПФ-132М	3,0	220	1060	3000	74,0	0,906	0,692
12	2ПБ-132М	3,7	220	2360	4000	81,0	0,346	0,224
13	ФПФ-132М	4,0	220	1500	4000	80,5	0,472	0,308
14	2ПФ-132	4,2	220	1000	3000	73,0	0,67	0,445
15	2ПФ-10М	4,2	220	750	2500	73,0	0,516	0,407
16	2ПБ-132М	4,5	220	3150	4000	81,5	0,185	0,148
17	2ПФ-132	5,5	220	1600	4000	80,5	0,269	0,22
18	2ПФ-160	5,6	220	800	2500	77,5	0,328	0,227
19	2ПФ-132М	6,0	220	2360	4000	83,0	0,226	0,166
20	2ПФ-160М	6,0	220	1000	3000	79,0	0,326	0,208
21	2ПБ-160М	7,1	220	3000	4000	86,5	0,081	0,056
22	2ПФ-132М	7,5	220	3000	4000	85,0	0,14	0,094
23	2ПФ-132	7,5	220	2120	4000	83,5	0,167	0,124
24	2ПФ-160М	7,5	220	1500	4000	83,0	0,145	0,101
25	ЦПФ-160	8,0	220	1000	2500	80,0	0,216	0,175
26	2ПБ-160	8,1	220	3350	4000	86,5	0,044	0,031
27	2ПФ-180М	9,0	220	750	2500	76,5	0,286	0,206
28	2ПФ-180М	10,0	220	750	2500	79,0	0,203	0,145
29	2ПФ-160	11,0	220	1500	4000	84,5	0,096	0,073
30	2ПФ-132	11,0	220	3000	4000	86,0	0,08	0,066

Приложение 2

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ВЫСОКОМОМЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ 2ПБВ

№ варианта	Тип электродвигателя	Номинальный момент, Нм	Максимальный момент, Нм	Номинальный ток, А	Максимальная частота вращения, об/мин	Напряжение при максимальной частоте вращения, В	Момент инерции	Электромеханическая постоянная времени, мс	Электромагнитная постоянная времени, мс
1	2	3	4	5	6	7	8	9'	10
31	2ПБВ-100М	7,5	70	20	2500	117	9,4	13,5	5,3
32	2пВВ-100L	11	100	25	2000	94	13	10,8	5,75
33	2ПБВ-112М	15	130	28	2000	110	34	16,8	6,75
34	2ПБВ-1121_	18,5	170	35	2000	138	42	14,6	7,3
35	2ПБВ-1128	22	210	32	2000	172	56	13,6	7,65
36	2ПБВ-132В	37	350	54	2000	147	176	22	7,35

Приложение 3

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ВЫСОКОМОМЕНТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ ДК-1

№ варианта	Тип электродвигателя	Номинальный момент, Нм	Максимальный момент, Нм в диапазоне частот вращения, об/мин			Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	Момент инерции	Электромагнитная постоянная времени	Электромеханическая постоянная времени, мс	Тепловая постоянная времени, мин	Номинальная частота вращения, об/мин
			0-500	500-1000	1000-2000							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
37	ДК1-1.7	1,7	11,9	11,9	11,9	36	8	2	2,5	18	45	1000
38	ДК1-2.3	2,3	16,1	16,1	11,5	48	7,5	2,45	3	13	50	1000
39	ДК1-3.5	3,5	24,5	17,5	10,5	65	7,5	2,85	3,5	10	60	1000
40	ДК1-5.2	5,2	36,4	26	15,6	110	6,5	3,9	5,3		60	1000

Приложение 4

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОДВИ- ГАТЕЛЕЙ СЕРИИ ДПУ

№ вари- анта	Тип элек- тродвигате- ля	Номи- наль- ный мо- мент, Нм	Макси- маль- ный мо- мент, Нм	Номи- наль- ное на- пряже- ние, В	Номи- наль- ный ток, А	Мо- мент инер- ции	Элек- тро- маг- нит- ная посто- янная вре- мени	Элек- тро- меха- ниче- ская посто- янная вре- мени, мс	Теп- ловая посто- янная вре- мени, мин	Номи- наль- ная час- тота враще- ния, Об/мин
1	2	3	4	5	6	7	∞	9	10	11
41	ДПУ87-75	0,7	3	23	4,5	0,21	1,5	9	15	1000
42	ДПУ127-220	2,1	15	30	11	2,8	3,2	25	50	1000
43	ДПУ127-450	4,3	30	57	11	4,9	3,8	50	55	1000

ЛИТЕРАТУРА

1. Ключев, В. И. Теория электропривода / В. И. Ключев. – Москва : Энергоатомиздат, 1985 . – 560 с.
2. Ильинский, Н. Ф. Общий курс электропривода / Н. Ф. Ильинский, В. Ф. Козаченко. – Москва : Энергоатомиздат, 1992. – 544 с.
3. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов / В. М. Терехов, О. Н. Осипов. – Москва : Академия, 2006. – 304 с.
4. Москаленко, В. В. Электрический привод / В. В. Москаленко. – Москва : Высшая школа, 2000. – 368 с.
5. Справочник по электрическим машинам. В 2 т. Т. 1 / под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
6. Справочник по электрическим машинам. В 2 т. Т. 2 / под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 688 с.
7. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск : Техноперспектива, 2006. – 363 с.
8. Гульков, Г. И. Системы автоматизированного управления электроприводами / Г. И. Гульков. – Минск : Новое знание, 2007. – 394 с.
9. Справочное пособие по теории систем автоматического регулирования и управления / под общ. ред. Е. А. Санковского. – Минск : Высшая школа, 1973. – 583 с.
10. Соколовский, Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г. Г. Соколовский. – Москва : Академия, 2006. – 272 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1 Общие методические указания к выполнению работ	4
2 Работа 1. Расчет характеристик и определение параметров двигателя как элемента САУ.....	5
3 Определение параметров электродвигателей по данным в каталоге	5
4 Расчет статических характеристик электропривода.....	8
5 Передаточные функции двигателя по управляющему и возму- щающему воздействиям.....	14
6 Разработка эквивалентных структурных схем двигателя.....	16
7 Работа 2. Разработка схемы управления дискретного электропривода ..	19
8 Принципы автоматического управления пуском и торможением двигателей	20
9 Расчет сопротивлений пусковых и тормозных реостатов и установок реле управления.....	21
Приложение 1 Технические данные электродвигателей серии 2П.....	27
Приложение 2 Технические данные высокомоментных электродвигателей серии 2ПБВ.....	28
Приложение 3 Технические данные высокомоментных электродвигателей серии ДК-1..	28
Приложение 4 Технические данные цилиндрических электродвигателей серии ДПУ...	29
Литература.....	30

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА , ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Структура электрической цепи. Электрический ток.
2. Короткое замыкание RL - цепи .

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА , ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Схемы замещения источников электрической энергии.
2. Электрические фильтры.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА , ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Основные законы электрических цепей.
2. Регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Эквивалентное преобразование резисторов, соединенных звездой и треугольником.
2. Закон Ома для магнитной цепи.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Метод контурных токов.
2. Расчет неразветвленных магнитных цепей.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА , ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Метод напряжения между двумя узлами.
2. Трансформатор. Назначение, устройство и принцип действия.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА , ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Основные понятия переменного тока.
2. Уравнения электромагнитного состояния обмоток реального трансформатора.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА , ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Представление синусоидальных величин комплексными числами.
2. Опыт холостого хода трансформатора.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА , ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Индуктивный элемент в цепи синусоидального тока.
2. Изменение вторичного напряжения при нагрузке и внешние характеристики трансформатора.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Резистивный элемент в цепи синусоидального тока.
2. Трехфазные трансформаторы.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Цепь синусоидального тока, содержащая резистор и конденсатор.
2. Механическая характеристика асинхронного двигателя.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА , ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Резонанс напряжений.
2. Пуск двигателя постоянного тока.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА , ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Резонанс токов.
2. Законы Ома и Кирхгофа для синусоидального тока.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА , ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Элементы трехфазных цепей.
2. Торможение асинхронного двигателя.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА , ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Схема соединения звездой трехфазной цепи. Несимметричная нагрузка.
2. К.п.д. асинхронного двигателя.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА , ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Мощность трехфазных цепей.
2. Основные понятия о переходных процессах.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА , ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Включение RL - цепи на постоянное напряжение.
2. Простейшая электрическая цепь постоянного тока.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Включение RC - цепи на постоянное напряжение.
2. Режимы работы электрической цепи.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА , ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Параллельное и последовательное соединения проводников.
2. Основные характеристики магнитного поля.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА , ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Закон непрерывности магнитного потока. Закон полного тока.
2. Метод непосредственного применения законов Кирхгофа.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА , ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Характеристики ферромагнитных материалов.
2. Метод наложения.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА , ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Расчет разветвленных магнитных цепей.
2. Нелинейные цепи постоянного тока.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА , ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Уравнения электромагнитного состояния обмоток идеализированного трансформатора.
2. Векторные диаграммы.

07.12.11г.

1. Схемы замещения трансформатора.
2. Действующие и средние значения синусоидальных E , U , I .

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА , ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Опыт короткого замыкания трансформатора.
2. Емкостной элемент в цепи синусоидального тока.

07.12.11г.

1. К.п.д. трансформатора.
2. Реальная катушка в цепи синусоидального тока.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА , ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Применение трансформаторов.
2. Устройство асинхронных машин.

07.12.11г.

1. Принцип действия асинхронного двигателя.
2. Последовательная цепь синусоидального тока.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА , ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Пуск асинхронного двигателя.
2. Схема соединения звездой трехфазной цепи. Симметричная нагрузка.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя.
2. Схема соединения треугольником трехфазной цепи.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Устройство машины постоянного тока.
2. Основные законы электрических цепей.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Режимы работы машины постоянного тока.
2. Метод контурных токов.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Основные понятия переменного тока.
2. Торможение двигателя постоянного тока. Рабочие процессы в машине постоянного тока.

07.12.11г.

"ЭЛЕКТРОТЕХНИКА , ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ"

1. Способы возбуждения машины постоянного тока.
2. Представление синусоидальных величин комплексными числами.

07.12.11г