

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА

сборник учебно-методических материалов
для направления подготовки 15.03.04 – Автоматизация технологических процессов и производств

Благовещенск, 2017

Печатается по решению
Редакционно-издательского совета
Энергетического факультета
Амурского государственного университета

Составители: Усенко В.И., Штыкин М.Д.

Электромеханика и электромеханотроника: сборник учебно-методических материалов для направления подготовки 15.03.04 – Автоматизация технологических процессов и производств. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2017.

©Амурский государственный университет, 2017
©Кафедра автоматизации производственных
процессов и электротехники, 2017
©Усенко В.И., Штыкин М.Д. : составители

Содержание

Введение	4
1. Краткий курс лекций	5
2. Методические рекомендации к практическим занятиям	19
3. Методические рекомендации для самостоятельной работы студентов	25
Библиографический список	30

ВВЕДЕНИЕ

Целью освоения дисциплины «Электромеханика и электромехатроника» является освоение основ теории электромеханического преобразования энергии, овладение методами анализа и расчета электромеханических преобразователей, анализа электромагнитных процессов и приобретение студентами навыков самостоятельного исследования путем закрепления теоретического материала в ходе выполнения лабораторных работ, на практических занятиях и в процессе курсового проектирования.

Задачи дисциплины в процессе всех видов занятий по изучению дисциплины студенты должны выполнить следующие задачи:

- изучить устройство и принцип действия различных типов электрических машин в составе электрических приводов и электромехатронных систем на основе физических явлений и законов, связанных с их работой и усвоенных в курсах физики и теоретической электротехники;

- научиться составлять математические модели и схемы замещения электрических машин и описывать переходные процессы в них;

- изучить основные характеристики, методы исследования и основы проектирования, усвоить вопросы испытания и эксплуатации электрических машин в составе конкретных электромехатронных систем.

В результате изучения дисциплины обучающиеся должны:

Знать

устройство, принцип действия и основные характеристики электрических машин; способы пуска и регулирования скорости электрических асинхронных двигателей; способы управления координатами электроприводов с электрическими двигателями различных типов.

Уметь

выбирать электрические машины для конкретных условий, включая их выбор по тепловым параметрам; определять параметры и выполнять расчеты основных типов электрических машин.

Владеть

навыками проведения испытаний и экспериментов с электрическими машинами в составе электромехатронных систем для снятия их основных характеристик и последующего управления координатами.

КРАТКИЙ КУРС ЛЕКЦИЙ ПО ЭЛЕКТРОМЕХАТРОНИКЕ

Тема 1. Введение. Основы механики электропривода

Введение. Электромехатроника и конкретно Мехатроника изучает синергетическое объединение узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами с целью проектирования и производства качественно новых модулей, систем, машин и комплекса машин с интеллектуальным управлением их функциональными движениями.

В состав традиционной машины входят следующие основные компоненты: механическое устройство, конечным звеном которого является рабочий орган; блок приводов, включающий силовые преобразователи и исполнительные двигатели; устройство компьютерного управления, верхним уровнем для которого является человек-оператор, либо другая ЭВМ, входящая в компьютерную сеть; сенсоры, предназначенные для передачи в устройство управления информации о фактическом состоянии блоков машины и движении МС.

Таким образом, наличие трех обязательных частей - механической (точнее электромеханической), электронной и компьютерной, связанных энергетическими и информационными потоками, является первичным признаком, отличающим мехатронные системы.

Электромеханическая часть включает механические звенья и передачи, рабочий орган, электродвигатели, сенсоры и дополнительные электротехнические элементы (тормоза, муфты). Механическое устройство предназначено для преобразования движений звеньев в требуемое движение

рабочего органа. Электронная часть состоит из микроэлектронных устройств, силовых преобразователей и электроники измерительных цепей. Сенсоры предназначены для сбора данных о фактическом состоянии внешней среды и объектов работ, механического устройства и блока приводов с последующей первичной обработкой и передачей этой информации в устройство компьютерного управления (УКУ). В состав УКУ мехатронной системы обычно входят компьютер верхнего уровня и контроллеры управления движением.

Устройство компьютерного управления выполняет следующие основные функции:

- управление процессом механического движения мехатронного модуля или многомерной системы в реальном времени с обработкой сенсорной информации;
- организация управления функциональными движениями МС, которая предполагает координацию управления механическим движением МС и сопутствующими внешними процессами. Как правило, для реализации функции управления внешними процессами используются дискретные входы/выходы устройства;
- взаимодействие с человеком-оператором через человеко-машинный интерфейс в режимах автономного программирования (off-line) и непосредственно в процессе движения МС (режим on-line);
- организация обмена данными с периферийными устройствами, сенсорами и другими устройствами системы.

Задачей мехатронной системы является преобразование входной информации, поступающей с верхнего уровня управления, в целенаправленное механическое движение с управлением на основе принципа обратной связи. Характерно, что электрическая энергия (реже гидравлическая или пневматическая) используется в современных системах как промежуточная энергетическая форма. Суть мехатронного подхода к проектированию состоит в интеграции в единый функциональный модуль двух или более элементов возможно даже различной физической природы. Другими словами, на стадии проектирования из традиционной структуры машины исключается как сепаратное устройство по крайней мере один интерфейс при сохранении физической сущности преобразования, выполняемого данным модулем.

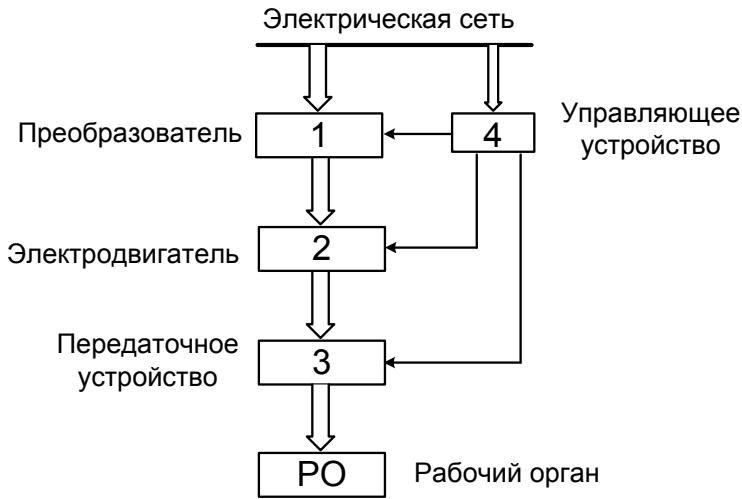
В идеальном для пользователя варианте мехатронный модуль, получив на вход информацию о цели управления, будет выполнять с желаемыми показателями качества заданное функциональное движение. Аппаратное объединение элементов в единые конструктивные модули должно обязательно сопровождаться разработкой интегрированного программного обеспечения. Программные средства МС должны обеспечивать непосредственный переход от замысла системы через ее математическое моделирование к управлению функциональным движением в реальном времени.

Основы механики электропривода.

Электрическим приводом называется управляемая электромеханическая система, предназначенная для преобразования электрической энергии в механическую и обратно и управления этим процессом.

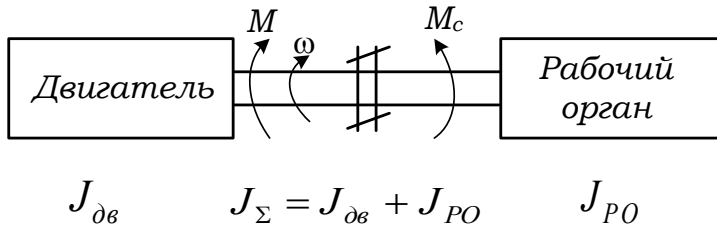
Электропривод имеет два канала – *силовой* и *информационный*. По первому транспортируется преобразуемая энергия, по второму осуществляется управление потоком энергии, а также сбор и обработка информации о состоянии и функционировании системы, диагностика ее неисправностей.

Силовой канал (энергетический) состоит из двух частей – электрической и механической и всегда содержит связующее звено – электромеханический преобразователь (двигатель), который преобразует электрическую энергию (с параметрами U и I) в механическую (с параметрами M и ω) и обратно. Двигатель подключается к электрическому преобразователю (трансформатор, выпрямитель, преобразователь частоты), преобразующему параметры электрической энергии, поступающей из сети. Для согласования момента M и скорости ω двигателя с моментом M_{po} и скоростью ω_{po} рабочего органа технологической машины используется механический преобразователь или передача (редуктор, пара винт-гайка, система блоков, кривошипно-шатунный механизм и т.п.).



Уравнение движение электропривода

К механической системе, совершающей вращательное движение относительно фиксированной оси вращения, прикладываются два момента: момент M , развиваемый электродвигателем (в дальнейшем – двигателем), и момент сопротивления движению M_c .



Механическая система вращается с постоянной скоростью, если момент двигателя равен моменту сопротивления движению, т.е. $M = M_c$. Такой режим работы электропривода называется *установившемся*. Поэтому момент сопротивления называют *статическим моментом*. Если скорость системы изменяется, то начинают сказываться инерционности, в результате чего появляется динамический момент, пропорциональный скорости изменения угловой скорости и моменту инерции J :

$$M_{\text{дв}} = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Момент инерции J ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$) – параметр, являющийся мерой инерционности тел, вращающихся относительно фиксированной оси вращения. Момент инерции материальной точки с массой m равен произведению массы на квадрат расстояния R от точки до оси вращения: $J = mR^2$. Момент инерции тела есть сумма моментов инерции материальных точек, составляющих это тело. Значения момента инерции для тел вращения приводятся в справочниках и каталогах.

При наличии динамического момента разность моментов двигателя и сопротивления уже не равна нулю: она равна динамическому моменту. Это позволяет записать *уравнение движения электропривода*, отражающее второй закон Ньютона, в виде:

$$M - M_{\text{н}} = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Положительное направление момента сопротивления принимают противоположным положительному направлению момента двигателя.

Приведение статических моментов и моментов инерции

Во многих случаях рабочий орган машины связан с валом ЭД через систему передач: зубчатых, канатных, текстурных и др. В этом случае непосредственное использование уравнения движения

$M = M_c - J \frac{d\omega}{dt}$ невозможно, так как моменты M и M_c приложены к разным валам, а инерцион-

ные массы вращаются с разными скоростями. В такой системе необходимо решить задачу приведения всех моментов сопротивления и моментов инерции отдельных кинематических звеньев к одному валу, обычно к валу электродвигателя. Такое приведение является только расчетной операцией.

Если РО машины соединяется с валом двигателя через редуктор с передаточным числом $i = \frac{\omega}{\omega_{po}}$,

то для того чтобы привести к валу двигателя момент сопротивления M_{PO} , реально прикладываемый к рабочему органу, нужно соблюсти условие равенства мощностей с учетом потерь в редукторе:

$$M_C \cdot \omega = \frac{\omega_{po} \cdot M_{PO}}{\eta_{ред}}$$

Здесь: M_{PO} – момент сопротивления движению рабочего органа;

ω_{po} – угловая скорость рабочего органа;

M_C – момент сопротивления (статический момент), приведенный к валу двигателя;

ω – угловая скорость вала двигателя;

$\eta_{ред}$ – КПД передачи (редуктора).

Следовательно, если известен статический момент на валу рабочего органа, то статический момент, приведенный к валу двигателя, определяется формулой:

$$M_C = \frac{\omega_{po} \cdot M_{PO}}{\omega \cdot \eta_{ред}} = \frac{M_{PO}}{\frac{\omega}{\omega_{po}} \cdot \eta_{ред}} = \frac{M_{PO}}{i \cdot \eta_{ред}}$$

Общее правило: для того, чтобы привести статический момент к валу двигателя, нужно реальный статический момент на валу РО разделить на передаточное число и КПД передачи:

$$M_C = \frac{M_{PO}}{i \cdot \eta_{ред}}$$

Для приведения момента инерции рабочего органа J_{PO} к валу двигателя нужно соблюсти условие равенства кинетических энергий:

$$\frac{J_{Dl \cdot \dot{\omega}} \cdot \omega^2}{2} = \frac{J_{Dl} \cdot \omega_{Dl}^2}{2}$$

Следовательно, приведенный к валу двигателя момент инерции рабочего органа

$$J_{PO.пп} = \frac{J_{PO}}{\left(\frac{\omega}{\omega_{PO}}\right)^2} = \frac{J_{PO}}{i^2}$$

Общее правило: для того, чтобы привести момент инерции к валу двигателя, нужно реальный момент инерции кинематического звена разделить на квадрат передаточного числа:

$$J_{PO.пп} = \frac{J_{PO}}{i^2}$$

Ротор двигателя также обладает моментом инерции, поэтому суммарный момент инерции J движущихся частей привода состоит из суммы момента инерции ротора двигателя $J_{рот}$ и приведенного момента инерции рабочего органа $J_{PO.пп}$:

$$J = J_{рот} + J_{PO.пп}$$

В некоторых кинематических схемах рабочих машин есть звенья с поступательным движением РО. В этом случае мощность РО определяется по формуле

$$P_{PO} = F_{PO} \cdot v_{PO}$$

где F_{PO} – усилие нагрузки на рабочем органе; v_{PO} – линейная скорость движения рабочего органа.

Тогда

$$M_C \cdot \omega = \frac{F_{PO} \cdot v_{PO}}{\eta_{ред}},$$

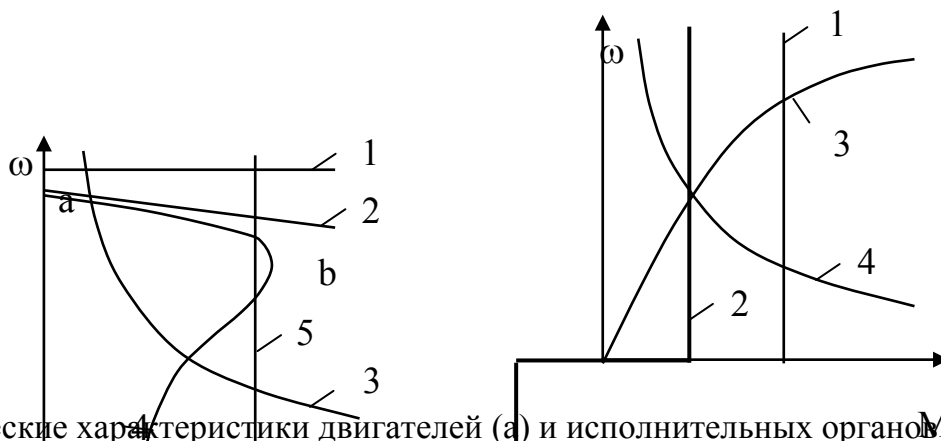
отсюда

$$M_C = \frac{F_{PO} \cdot v_{PO}}{\eta_{ред} \cdot \omega} = \frac{F_{PO} \cdot \rho}{\eta_{ред}},$$

где $\rho = \frac{v_{PO}}{\omega}$ – радиус приведения усилия нагрузки к валу двигателя.

Тема 2. Механические характеристики и режимы работы электрических двигателей

Механической характеристикой двигателя называется зависимость его угловой скорости от развиваемого им момента $\omega(M)$. Различают естественную и искусственные характеристики двигателей. Естественной называется механическая характеристика двигателя, которая соответствует основной схеме включения двигателя, номинальным параметрам питающего напряжения и отсутствию в электрических цепях двигателя дополнительных элементов.



Механические характеристики двигателей (а) и исполнительных органов (б)

На рисунке (а) показаны естественные механические характеристики наиболее распространенных двигателей: 1 – синхронного двигателя, 2 – двигателя постоянного тока независимого возбуждения, 3 – двигателя постоянного тока последовательного возбуждения, 4 – асинхронного двигателя. Характеристика 5 – пример абсолютно мягкой механической характеристики.

На рис. (б) показаны приведенные к валу двигателя механические характеристики $\omega(M_c)$ некоторых исполнительных органов.

Для оценки механической характеристики (как двигателей, так и механизмов) вводится понятие жесткости, как модуля производной момента по скорости

$$\beta = |dM/d\omega| \approx |\Delta M/\Delta \omega| \quad (1.11)$$

Механические характеристики можно разделить на четыре основные категории: абсолютно жесткие ($\beta = \infty$), жесткие (с большой жесткостью), мягкие (с малой жесткостью) и скоростях – положительна и невелика. Абсолютно мягкая механическая характеристика ($\beta = 0$) – это характеристика, при которой момент двигателя с изменением угловой скорости остается неизменным (кривая 5). Такой характеристикой обладает, например, двигатель постоянного тока независимого возбуждения при питании от источника тока (или при работе в замкнутых системах электропривода в режиме стабилизации тока якоря).

Имея механическую характеристику двигателя $\omega(M)$ и приведенную характеристику исполнительного органа $\omega(M_c)$ можно найти точку установившегося режима работы $M = M_c$. Для этого изобразим эти две характеристики на одном графике. Факт пересечения этих характеристик говорит о возможности совместной работы двигателя и рабочей машины, а точка их пересечения является точкой установившегося движения.

Для полного анализа режима установившегося движения (устойчивой работы) необходимо определить, является ли движение *устойчивым*. Статически устойчивым будет такое установившееся движение, которое, будучи выведенным из установившегося режима каким-либо внешним возмущением, возвращается в этот режим после исчезновения этого возмущения. В противном случае режим будет неустойчивым. При неустойчивом движении любое, даже самое малое, отклонение скорости от установившегося значения приводит к изменению состояния привода – он не возвращается в точку установившегося режима. Привод статически устойчив, если в точке установившегося режима выполняется условие

$$\partial M / \partial \omega - \partial M_c / \partial \omega < 0 \quad \text{или} \quad \beta - \beta_c < 0$$

Условие означает, что привод статически устойчив, если при положительном приращении угловой скорости момент двигателя окажется меньше момента сопротивления и привод вследствие этого затормозится до прежнего значения скорости. При отрицательном приращении угловой скорости момент двигателя окажется больше момента сопротивления и привод вследствие этого разгонится до прежнего значения скорости.

Тема 3. Параметрические способы регулирования скорости электропривода электромеханотронных систем

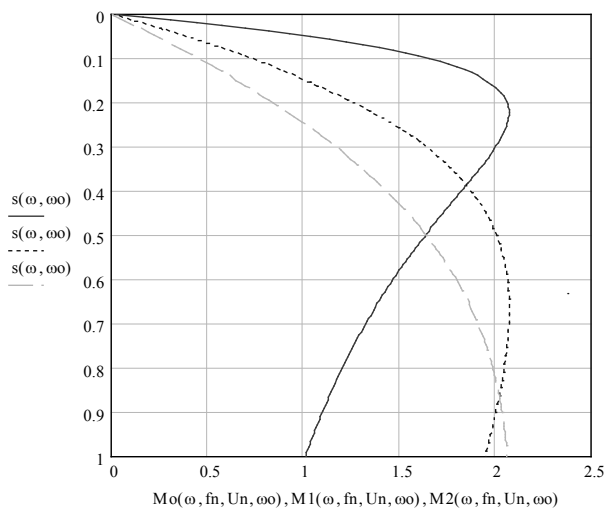
Распространенным является способ регулирования скорости, тока и момента АД с фазным ротором при введении (и изменении) добавочных сопротивлений в цепь ротора. Основным достоинством этого способа является простота реализации, однако его применение связано со значительным снижением КПД электропривода.

Схема, иллюстрирующая реализацию этого метода, а также соответствующие механические характеристики – естественная и построенные для $R_{2д} = 2R_2'$ и $R_{2д} = 4R_2'$, показаны ниже.

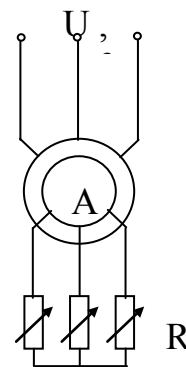
Основные особенности получаемых при этом механических характеристик следующие:

- Скорость идеального холостого хода не изменяется, все характеристики исходят из точки идеального холостого хода;
- Величина максимального момента M_k остается неизменной;
- Критическое скольжение s_k возрастает с ростом $R_{2д}$.

Использование этих характеристик для регулирования скорости АД аналогично регулированию скорости введением добавочных сопротивлений в цепь якоря ДПТ.



а)



б)

Регулирование координат АД с помощью добавочных сопротивлений в цепи ротора

а) механические характеристики, б) схема.

Диапазон регулирования небольшой - примерно $2 \div 3$, что определяется снижением жесткости характеристики и ростом потерь с увеличением диапазона регулирования скорости. Плавность регулирования небольшая, и определяется плавностью изменения $R_{2\omega}$. Скорость АД меняется только вниз от основной.

Затраты, связанные с созданием данной системы электропривода, невелики, однако расходы при эксплуатации весьма значительны. Так, при снижении скорости до половины синхронной ($s=0$), половина электромагнитной мощности расходуется на электрические потери в роторе, и КПД электропривода заведомо ниже 50%.

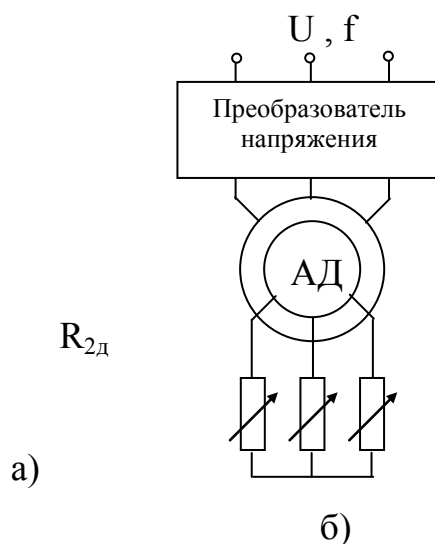
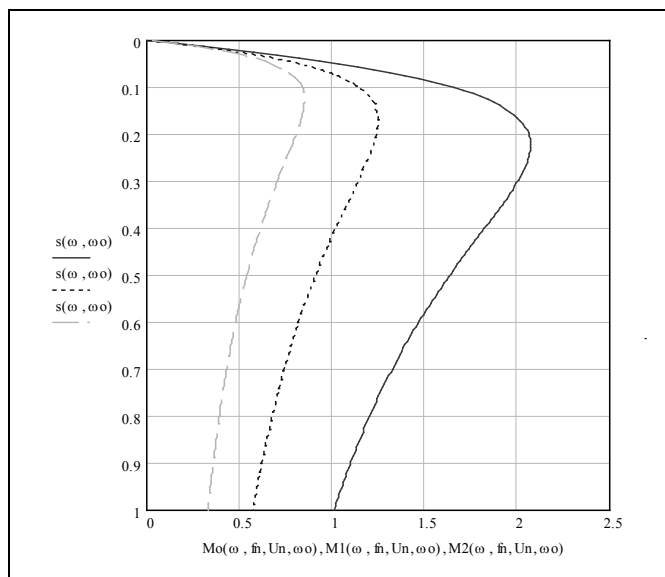
Еще одним недостатком данного способа регулирования скорости является использование асинхронного двигателя с фазным ротором – контактного, более дорогого и менее надежного по сравнению с короткозамкнутым.

Этот способ регулирования применяется в тех случаях, когда требуется небольшой диапазон регулирования скорости и работа на пониженных скоростях непродолжительна – например в подъемно-транспортных механизмах.

Он также применяется для регулирования тока и момента при пуске АД. Действительно, при наличии добавочных сопротивлений в цепи ротора, возрастает пусковой момент и уменьшается пусковой ток, что благоприятно сказывается на условиях пуска. По мере разгона двигателя величину этих сопротивлений уменьшают.

Регулирование скорости АД в системе преобразователь напряжения – двигатель.

Одним из возможных способов регулирования скорости АД является изменение напряжения приложенного к обмотке статора. Соответствующая схема электропривода показана ниже. Между сетью и двигателем включен преобразователь напряжения (ПН), изменяющий величину напряжения подводимого к статору АД.



Регулирование скорости АД изменением напряжения на статоре:

а) механические характеристики, б) схема

Возможность регулирования скорости АД при изменении напряжения следует из формулы, в соответствии с которой с изменением U можно изменять величину критического (максимального) момента, получая тем самым искусственные характеристики. Критическое скольжение и синхронная скорость АД от напряжения не зависят, и при таком способе регулирования остаются неизменными.

Как видно из графиков, получаемые в данной разомкнутой схеме искусственные характеристики оказываются мало пригодными для регулирования скорости, так как с уменьшением напряжения резко снижаются критический момент и перегрузочная способность, а диапазон регулирования скорости оказывается очень маленьким.

Несколько лучшие результаты можно получить, используя систему ПН-АД с отрицательной обратной связью по скорости. Могут быть получены относительно жесткие механические характеристики при удовлетворительной перегрузочной способности и диапазоне регулирования скорости порядка 10. Регулирование плавное, вниз от естественной механической характеристики.

Вместе с тем эта система регулирования скорости связана с большими потерями в обмотке ротора, особенно при работе на низких скоростях в области больших скольжений.

Тема 4. Частотное регулирования скорости асинхронного двигателя

Частотный способ регулирования является наиболее перспективным и широко используемым в настоящее время способом регулирования скорости АД. Принцип его заключается в том, что изменяя частоту питающего напряжения f_1 , можно, в соответствии с выражением $\omega_0 = 2\pi f_1/p$, изменять угловую скорость вращения магнитного поля (синхронную скорость вращения ротора), получая тем самым различные искусственные характеристики.

Этот способ обеспечивает плавное регулирование в широком диапазоне, получаемые характеристики обладают высокой жесткостью. Электрические потери в роторе, связанные со скольжением, в этом случае невелики, поэтому частотный способ наиболее экономичен.

Для лучшего использования АД и получения высоких энергетических показателей его работы – коэффициента мощности, коэффициента полезного действия и перегрузочной способности – одновременно с изменением частоты приложенного напряжения, необходимо изменять и его величину.

Применяются различные законы изменения напряжения в зависимости от характера нагрузки. Часто исходят из условия сохранения постоянной перегрузочной способности λ , которая равна отношению критического момента M_k к моменту нагрузки M_c – $\lambda = M_k / M_c = const$.

Если пренебречь активным сопротивлением статора, то из (9) получим

$$\lambda = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_o \cdot X_k \cdot M_c} = A \cdot \frac{U_1^2}{f_1^2 \cdot M_c} = const$$

где A – постоянная, не зависящая от f_1 . Из (10) следует, что для двух любых частот f_{1i} и f_{1k}

$$U_{1i}^2 / (f_{1i}^2 \cdot M_{ci}) = U_{1k}^2 / (f_{1k}^2 \cdot M_{ck}),$$

где M_{ci} и M_{ck} – моменты нагрузки при скоростях, соответствующих частотам f_{1i} и f_{1k} .

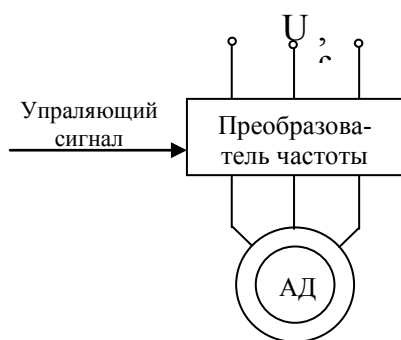
С помощью формулы могут быть получены частные законы изменения напряжения и частоты при различных зависимостях момента нагрузки M_c от скорости. Так при постоянном моменте нагрузки $M_c = const$:

$$U_1 / f_1 = const,$$

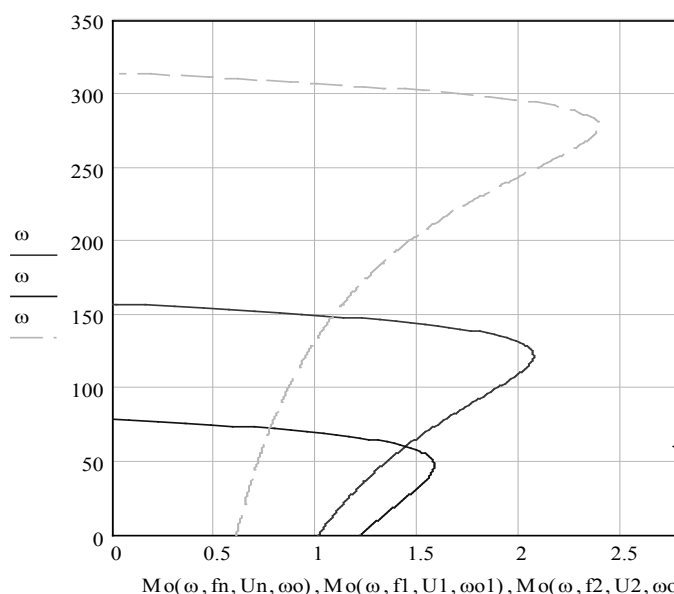
то есть напряжение должно изменяться пропорционально частоте.

На следующем рисунке приведены механические характеристики АД при частотном регулировании, осуществленном в соответствии с условием $U_1 / f_1 = const$.

Однако, как видно из графиков, перегрузочная способность не осталась неизменной. В действительности, при одновременном уменьшении частоты и напряжения, перегрузочная способность падает - прежде всего, из-за влияния активного сопротивления статора R_1 , вызывающего уменьшение ЭДС и магнитного потока машины.



а)



б)

Схема (а) и механические характеристики (б) при частотном управлении АД.

$$\text{Здесь } f_1 = f_n/2, U_1 = U_n/2, f_2 = 2f_n, U_2 = 2U_n$$

Для компенсации этого влияния следует, с уменьшением частоты, снижать напряжение в меньшей степени.

Следует заметить, что рассмотренные законы изменения напряжения U_1 при изменении частоты f_1 не в полной мере отражают специфику работы АД при частотном регулировании.

Магнитный поток асинхронной машины,

$$\Phi_m = -\frac{U_1 - I_1 \cdot Z_1}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot f_1 \cdot W_1 \cdot K_w},$$

зависит не только от напряжения U_1 и частоты f_1 , но и от тока машины. Максимальный магнитный поток Φ_{mo} имеет место в режиме холостого хода, когда можно с достаточной точностью принять $U_1 \approx -E_1$ и

$$\Phi_{mo} = -\frac{U_1}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot f_1 \cdot W_1 \cdot K_w}$$

Значение потока холостого хода, соответствующее номинальному напряжению и номинальной частоте, является предельным для асинхронной машины. При любом другом режиме текущее значение потока не должен его превышать более чем на 10–15 %.

Частотное регулирование в соответствии с законом $U_1 / f_1 = \text{const}$, когда одновременно изменяется и частота и напряжение, соответствует этому требованию. Действительно, в формуле одновременно растут (или падают) и числитель и знаменатель и поток остается практически неизменным.

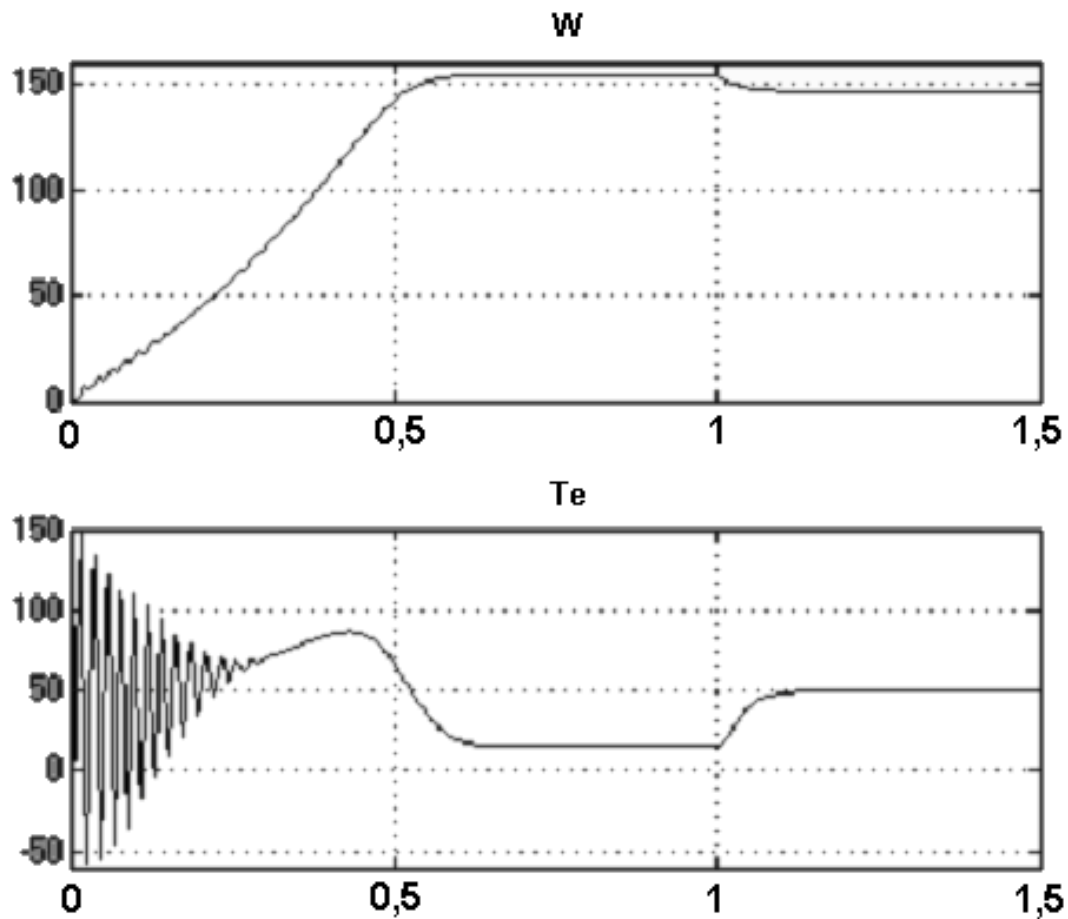
Совсем другое дело закон $U_1 / f_1^2 = \text{const}$ (4.16). Он требует более быстрого увеличения напряжения, чем частоты, и здесь необходимо проверять, не превосходит ли величина магнитного потока допустимое значение ($\Phi_{mo} \geq \Phi_m$).

Тема 5. Переходные процессы в электроприводах и электромехатронных системах

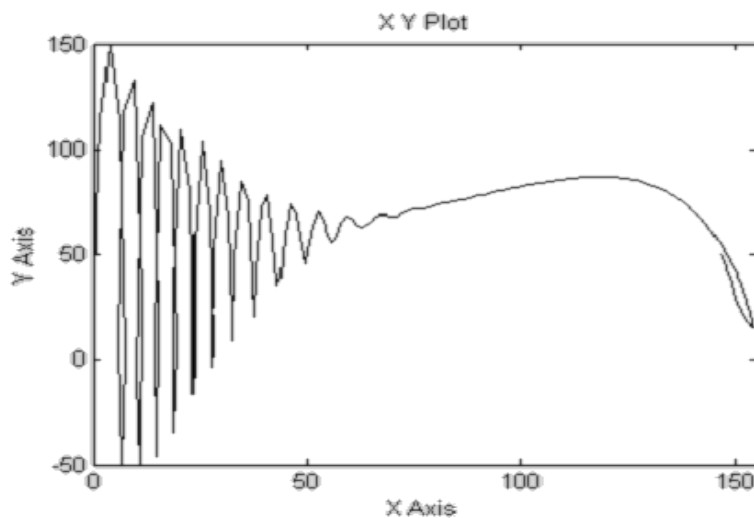
Электромагнитные переходные процессы описываются системой (вообще говоря нелинейных) дифференциальных уравнений достаточно высокого (обычно 5-го) порядка, и их анализ обычно выполняется численно либо с помощью моделей.

Переходные токи и моменты содержат принужденную и свободную составляющие, и изменяются по сложным колебательным зависимостям.

Для примера на рисунке приведены, полученные с помощью Matlab, графики зависимости скорости $\omega(t)$ и момента $M(t)$ от времени при прямом пуске асинхронного короткозамкнутого двигателя.



Графики зависимости скорости $\omega(t)$ и момента $M(t)$ от времени



Зависимость момента от угловой скорости $M(\omega)$.

В процессе моделирования вначале выполнялся прямой пуск АД, а затем – наброс (скачкообразное увеличение) нагрузки до номинальной. На графиках хорошо видны (в соответствующий момент времени $t = 1$) уменьшение скорости и рост момента.

С помощью зависимостей $\omega(t)$ и $M(t)$ можно построить так называемую динамическую механическую характеристику АД $M(\omega)$, представляющую собой фазовую траекторию переходного процесса пуска АД.

Сравнивая эту характеристику со статической механической характеристикой, можно заметить весьма существенные отличия.

В первую очередь они связаны с колебаниями динамического момента, причем максимальные значения переходного момента весьма значительны, и могут в несколько раз превосходить максимальный момент статического режима.

В некоторые моменты времени динамический момент может даже стать отрицательным (тормозным), что можно видеть на начальном участке кривой момента.

Другое существенное отличие динамической механической характеристики от статической заключается в том, что она определяется не только параметрами самой машины, но и моментом нагрузки и моментом инерции электропривода. И, разумеется, характер кривых зависит от вида переходного процесса (пуск, наброс нагрузки, реверс, торможение).

Сравнение графиков различных переходных процессов позволяет отметить следующую закономерность: при увеличении как момента инерции, так и момента нагрузки увеличивается длительность как механического, так и электромеханического переходного процесса.

Для переходных процессов в системе ПЧ – АД характерны существенно меньшие броски тока и момента, чем в случае прямого пуска двигателя. Задавая желаемый закон изменения частоты и напряжения, можно реализовать требуемые графики изменения скорости АД в переходном процессе.

Тема 6. Энергетика электроприводов

Анализ теплового состояния электродвигателей является одной из важнейших задач, возникающих при проектировании и эксплуатации системы электропривода.

Любая электрическая машина, благодаря возникающим в ней потерям мощности, при работе нагревается. Этот нагрев может достигать только определенной, допустимой температуры, зависящей в первую очередь от класса нагревостойкости.

Соблюдение установленных ограничений по нагревостойкости обеспечивает нормативный срок службы - в пределах 15 – 20 лет. Превышение допустимой температуры ведет к преждевременному разрушению изоляции обмоток и сокращению срока службы электрической машины.

С другой стороны, анализ теплового состояния электродвигателя позволяет судить о степени его загрузки. Если выяснится, что нагрев двигателя близок норме, это свидетельствует о хорошем использовании установленной мощности двигателя. Значит, электропривод имеет наилучшие технико-экономические показатели работы, в первую очередь КПД и коэффициент мощности.

Если же окажется, что нагрев двигателя существенно ниже допустимого, это свидетельствует о недогрузке двигателя и неправильном выборе его мощности. Работа такого двигателя будет характеризоваться низкими энергетическими показателями.

Допустимый перегрев – среднее превышение температуры обмотки t_{06} над температурой окружающей среды t_{0c} $\Theta = t_{06} - t_{0c}$, часто определяют по методу сопротивлений.

При изготовлении современных электрических машин обычно используются классы В, F и H.

Ниже приведены допустимые температуры (t) и перегревы (Θ) для классов изоляции А - С:

Класс изоляции	А	Е	В	F	Н	С
$t_{\text{макс}} \text{ } ^\circ\text{C}$	105	120	135	155	180	>180
$\Theta \text{ } ^\circ\text{C}$	60	70	80	100	125	>125

Класс **В** включает слюду, асбест, стекловолокно со связующими составами органического происхождения. Класс **F** включает те же материалы, что и класс В, но со связующими модифицированными кремнийорганическими соединениями. Класс **Н** включает те же материалы, что и класс В, но с кремнийорганическими связующими.

Стандартная температура окружающей среды принимается равной $40 \text{ } ^\circ\text{C}$. Этой температуре соответствует номинальная мощность двигателя, указанная на его щитке. При существенно более низкой температуре двигатель может быть нагружен несколько выше номинальной мощности, а при более высокой температуре окружающей среды, мощность должна быть снижена.

Температура обмотки электрической машины может быть определена по величине ее активного сопротивления. Для этого предварительно измеряют сопротивление обмотки электрической машины R_0 при температуре окружающей среды t_0 , а затем, после достаточно длительной работы при номинальном режиме, измеряют сопротивление R_t при рабочей температуре t . Из формулы зависимости сопротивления от температуры $R_t = R_0(1 + \alpha\Theta)$ получаем

$$\Theta = (R_t / R_0 - 1) / \alpha,$$

где α – температурный коэффициент сопротивления. Для меди $\alpha = 1/255$, для алюминия $\alpha = 1/270$.

Точное исследование процессов нагрева и охлаждения двигателя является очень сложной задачей. Двигатель представляет собой совокупность деталей и узлов различной конфигурации, выполненных из различных материалов, что обуславливает их различные теплоемкость и теплопередачу. Неодинаковыми являются как условия нагрева отдельных частей двигателя, так и направления тепловых потоков, зависящих от режима его работы.

Поэтому обычно исследование тепловых процессов в двигателе выполняется при следующих упрощающих допущениях:

- Двигатель рассматривается как однородное тело, имеющий одинаковую теплопроводность и одинаковую температуру во всех точках;
- Теплоотдача во внешнюю среду пропорциональна разности температур двигателя и окружающей среды;
- Температура окружающей среды есть величина постоянная;
- Теплоемкость двигателя и коэффициент теплоотдачи не зависят от температуры.

Для определения характера изменения температуры, рассмотрим баланс тепловой энергии $\Delta P_{\Sigma} dt$, выделяющейся в двигателе за элементарный отрезок времени dt . Одна ее часть (Λdt) отдается в окружающую среду, а другая ($C d\tau$) идет на нагрев двигателя:

$$\Delta P_{\Sigma} dt = \Lambda \tau dt + C d\tau,$$

где: ΔP_{Σ} – суммарные потери в двигателе (Вт), $\tau = t_{дв} - t_{oc}$ – превышение температуры двигателя $t_{дв}$ над температурой окружающей среды t_{oc} ,

Λ - теплоотдача двигателя – количество тепла, отдаваемое двигателем в окружающую среду за 1 с. при $\tau = 1$ °С (дж/ (с.град)), $C = Gc$ – теплоемкость двигателя, равная произведению массы двигателя G (кг) на его удельную теплоемкость c (дж/кг·град).

Выражение может быть использовано для исследования изменения перегрева двигателя как при нагреве, так и при охлаждении. Необходимо лишь подставлять соответствующие значения $\tau_{нач}$, $\tau_{уст}$ и T_n . Однако тепловые постоянные времени нагрева T_n и охлаждения T_o могут отличаться. Обычно охлаждение неподвижного двигателя происходит медленнее, чем нагрев работающей машины, и поэтому $T_o > T_n$.

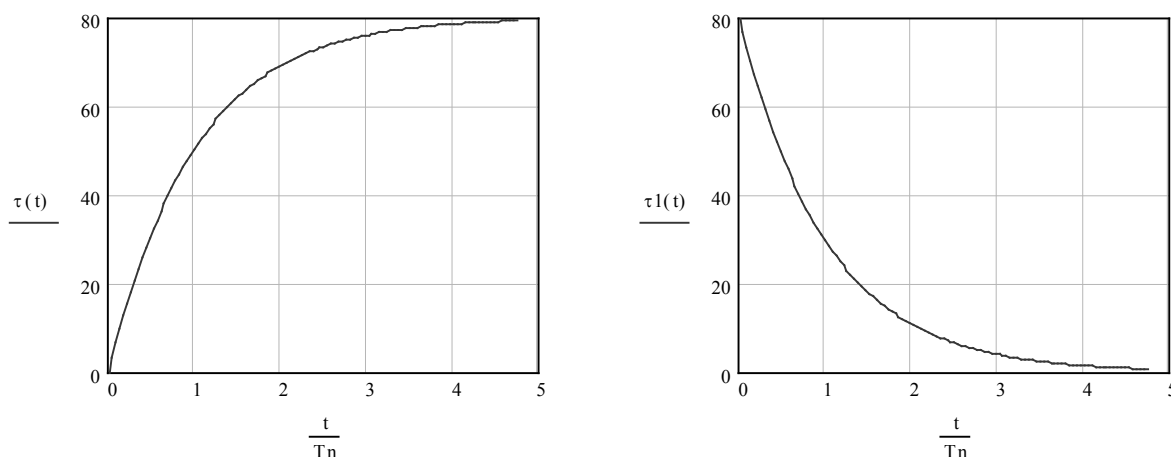


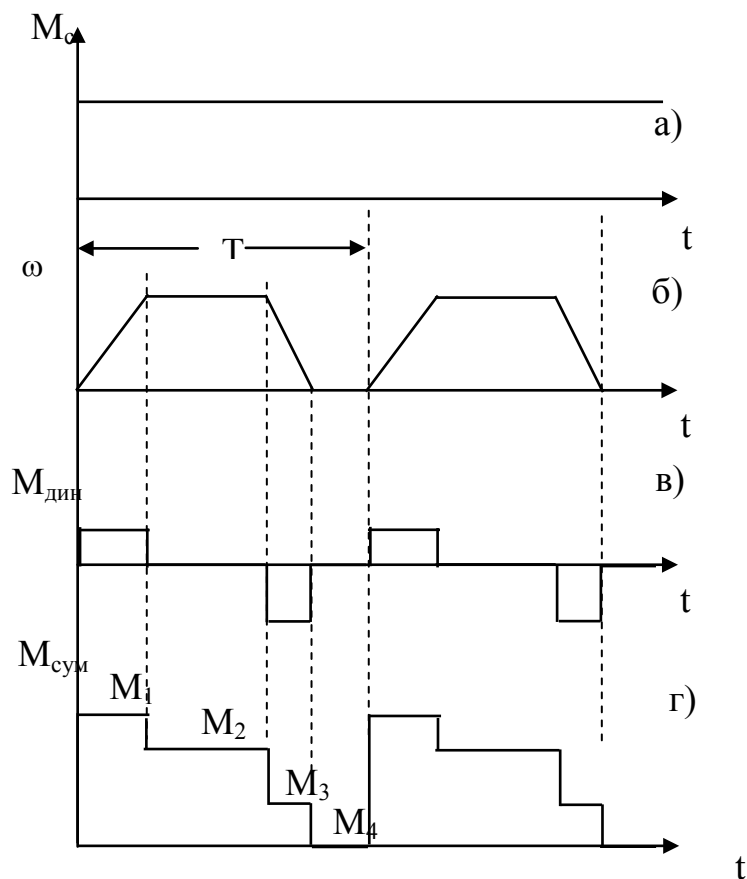
Рис. 12.1 Кривые нагрева и охлаждения двигателя 4А112М4

На рис. 12.1 даны кривые нагрева и охлаждения двигателя 4А112М4, построенные при следующих значениях параметров теплового режима: $\Lambda = 11.7$ дж/(с.град), $\tau_{уст} = 80$ °С, $C = 2708$ дж/кг·град и $T_n = T_o = 232$ с.

Хотя время достижения установившейся температуры теоретически бесконечно велико, процесс нагрева можно считать установившимся при $\tau = (0.95 - 0.98) \tau_{уст}$, ему соответствует время $t_{уст} \approx (3 - 4) T_n$. Так как теплоемкость двигателя (C) пропорциональна его объему, а теплоотдача – площади его поверхности, то двигателя большей мощности, имеющие большие габариты, имеют и большую постоянную времени. Постоянная времени нагрева двигателя лежит в интервале от нескольких минут до нескольких часов.

Если выбранный двигатель в ходе проверок п.п. 2) и 3) не удовлетворяет требованиям, то выбирают другой двигатель (как правило, большей мощности) и проверки повторяются.

Основой для расчета мощности и выбора электродвигателя является нагрузочная диаграмма $M(t)$ и диаграмма скорости $\omega(t)$ исполнительного органа рабочей машины (рис.11.1).



К расчету мощности двигателя: а) нагрузочная диаграмма исполнительного механизма; б) диаграмма скорости нагрузочного механизма приведенного к валу двигателя; в) динамический момент; г) суммарный момент

Расчет ведем в следующей последовательности:

- 1) Определяем номинальный момент двигателя. Если эквивалентный момент нагрузки $M_{c.э}$ задан, то расчетный номинальный момент двигателя

$$M_{ном} \geq k_3 \cdot M_{c.э},$$

где $k_3 = 1.1 \div 1.3$ – коэффициент запаса, предварительно учитывающий динамические режимы работы электродвигателя.

Если момент сопротивления изменяется во времени и нагрузочная диаграмма имеет несколько участков (на рис. 5.1 $M_c = const$), $M_{c.э}$ определяется как среднеквадратичная величина за цикл (период T)

$$M_{c.э} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_1^n M_{c.i}^2 \cdot t_i},$$

где $M_{c.i}$ и t_i – соответственно момент и длительность i -го участка нагрузочной диаграммы.

- 2) Находим номинальную расчетную мощность двигателя

$$P_{\text{ном}} = M_{\text{ном}} \cdot \omega_{\text{ном}};$$

- 3) Из каталога выбираем двигатель ближайшей большей мощности, имеющий конструктивное исполнение, соответствующее условиям работы данной машины;
- 4) Осуществляем проверку двигателя по перегрузочной способности. Для этого строим зависимость суммарного момента двигателя от времени (рис.21г)

$$M_{\text{сум}}(t) = M_c + J_c \, d\omega / dt,$$

где J_c – суммарный момент инерции привода.

Для проверки двигателя по перегрузочной способности сопоставляем максимальный (критический) момент двигателя M_{max} с максимальным моментом M_1 взятым из зависимости $M_{\text{сум}}(t)$. Должно выполняться следующее неравенство

$$M_{\text{max}} \geq M_1;$$

- 5) Проверяем асинхронный двигатель по условиям пуска, для чего сопоставляем его пусковой момент с моментом нагрузки при пуске: $M_{\text{п}} \geq M_{\text{с.п.}}$.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Задачей практических занятий является закрепление знаний, полученных на лекциях, выработка практических навыков применения информации, необходимой инженеру в процессе его деятельности. При решении задач обращается внимание на логику решения, на правильность используемых методов. После этого проводится анализ полученного решения, результат сопоставляется с реальными объектами, что вырабатывает у студентов инженерную интуицию.

К выполнению заданий следует приступить после прочтения теоретического материала, изложенного на лекциях и в рекомендуемой литературе. Привозникновении затруднений с выполнением заданий необходимо проконсультироваться у преподавателя. Далее по каждой теме приводится по одному примеру или одной задаче для демонстрации разделов дисциплины «Электрические машины».

Тема 1. Введение. Введение. Основы механики электропривода.

Задача. Для механической системы подъемника, показанной на рисунке 1.1 и имеющей следующие данные: моменты инерции вала двигателя вместе с шестерней $J_d = 0,15 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ и барабана вместе с шестерней $J_b = 1,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; передаточное число редуктора $i = 5$; КПД редуктора $\eta_p = 0,97$ и барабана $\eta_b = 0,95$; скорости двигателя $\omega_d = 90 \text{ с}^{-1}$ и подъема груза $V_z = 0,1 \text{ м/с}$; масса груза $m_z = 800 \text{ кг}$, определить значения приведенных к валу двигателя моментов инерции J и сопротивления M_c при подъеме груза.

Решение.

1. Определяем силу тяжести

$$F_c = m_z g = 800 \cdot 9,81 = 7848 \text{ Н}$$

2. Определяем радиус приведения

$$\rho = \frac{V_z}{\omega_d} = \frac{0,1}{90} = 1,11 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

3. Определяем приведенный момент сопротивления

$$M_c = \frac{F_c \cdot \rho}{\eta_M} = \frac{F_c \cdot V_z}{\eta_p \cdot \eta_b \cdot \omega_d} = \frac{7848 \cdot 0,1}{0,97 \cdot 0,95 \cdot 90} = 9,46 \text{ Н}$$

4. Определяем приведенный момент инерции

$$J = J_{\delta} + \frac{J_{\delta}}{i^2} + m_c \cdot \rho^2 = 0,15 + \frac{1,8}{5^2} + 800 \cdot 0,00111^2 = 0,223 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Тема 2. Механические характеристики и режимы работы электрических двигателей

Задача. Для двигателя постоянного тока независимого возбуждения, имеющего следующие паспортные данные : мощность на валу $P_{ном} = 2,5 \text{ кВт}$; напряжение $U_{ном} = 110 \text{ В}$; скорость вращения якоря $\omega_{ном} = 157,1 \text{ с}^{-1}$; КПД $\eta_{ном} = 0,83$, рассчитать и построить естественные механическую и электромеханическую характеристики.

Решение.

1. Естественная механическая и электромеханическая характеристики.

Номинальная мощность, потребляемая двигателем из сети:

$$P_{1\dot{i}\dot{i}} = \frac{P_{\dot{i}\dot{i}}}{\eta_{\dot{i}\dot{i}}} = \frac{2500}{0,83} = 3012 \text{ Вт} .$$

Номинальный момент двигателя:

$$M_{\dot{i}\dot{i}} = \frac{P_{\dot{i}\dot{i}}}{\omega_{\dot{i}\dot{i}}} = \frac{2500}{157,1} = 15,9 \text{ Н} \cdot \text{м} .$$

Номинальный ток якоря:

$$I_{\dot{i}\dot{i}} = \frac{P_{1\dot{i}\dot{i}}}{U_{\dot{i}\dot{i}}} = \frac{3012}{110} = 27,4 \text{ А} .$$

Коэффициент потока и ЭДС:

$$C = \frac{M_{\dot{i}\dot{i}}}{I_{\dot{i}\dot{i}}} = \frac{15,9}{27,4} = 0,581 \text{ В} \cdot \text{А}^{-1} .$$

Угловая скорость идеального холостого хода:

$$\omega_0 = \frac{U_{\dot{i}\dot{i}}}{C} = \frac{110}{0,581} = 188 \text{ с}^{-1} .$$

Номинальная ЭДС якоря:

$$E_{\dot{i}\dot{i}} = C \cdot \omega_{\dot{i}\dot{i}} = 0,581 \cdot 157,1 = 91,3 \text{ В} .$$

Сопротивление обмотки якоря:

$$R_{\dot{y}} = \frac{U_{\dot{i}\dot{i}} - E_{\dot{i}\dot{i}}}{I_{\dot{i}\dot{i}}} = \frac{110 - 91,3}{27,4} = 0,683 \text{ Ом} .$$

Момент сопротивления и соответствующий ему ток:

$$M_{\dot{n}} = 0,8 \cdot M_{\dot{i}\dot{i}} = 0,8 \cdot 15,9 = 12,7 \text{ Н} \cdot \text{м} ;$$

$$I_{\dot{n}} = 0,8 \cdot I_{\dot{i}\dot{i}} = 0,8 \cdot 27,4 = 21,92 \text{ А} .$$

Частота вращения якоря двигателя и ЭДС для момента сопротивления M_c при работе на естественной характеристике:

$$\omega_{\dot{a}\dot{n}}(M_{\dot{n}}) = \omega_0 - \frac{R_{\dot{y}}}{C^2} M_{\dot{n}} = 188 - \frac{0,683}{0,581^2} \cdot 12,7 = 163,5 \text{ с}^{-1} ;$$

$$E_{\dot{a}\dot{n}} = C \cdot \omega_{\dot{a}\dot{n}} = 0,581 \cdot 163,5 = 95 \text{ В} .$$

Формулы для построения естественных характеристик:

$$\omega_{\dot{a}}(M) = \omega_0 - \frac{R_{\dot{y}}}{C^2} \cdot M ; \quad \omega_{\dot{a}}(I) = \omega_0 - \frac{R_{\dot{y}}}{C} \cdot I .$$

Тема 3. Параметрические способы регулирования скорости электропривода

ДПТ НВ не допускают прямого пуска, так как пусковые токи ($I_{\text{п}} = U/R_{\text{я}}$) превышают допустимые значения по условиям коммутации на коллекторе. Поэтому пуск осуществляют подключением двигателя к сети при наличии в цепи якоря дополнительного резистора.

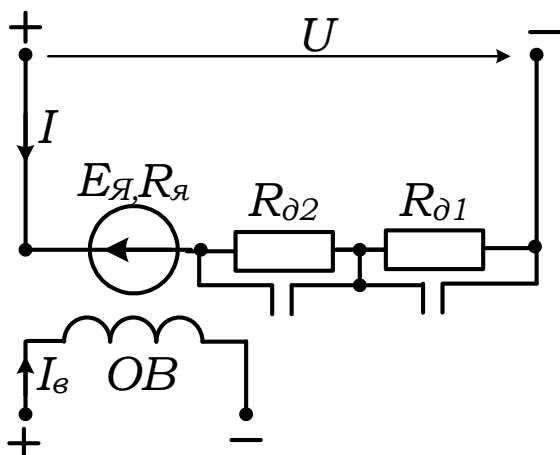
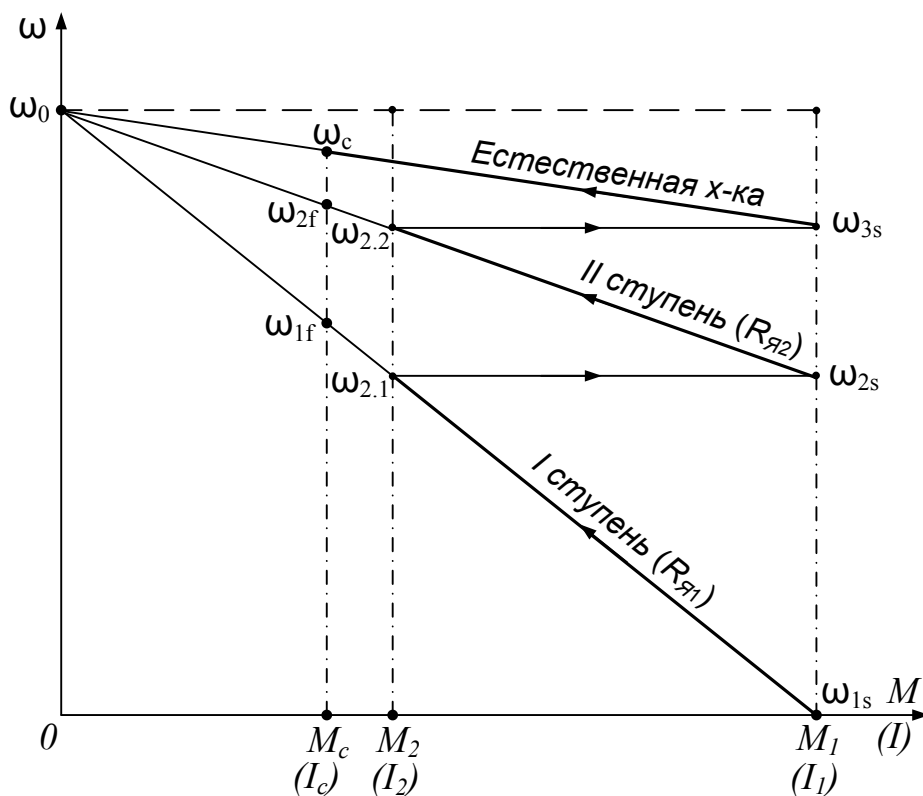


Схема пуска ДПТ НВ

По мере разгона двигателя секции этого резистора выводятся (шунтируются) коммутирующей аппаратурой. Т.о., пуск осуществляется в несколько ступеней. При этом двигатель переводится с одной реостатной характеристики на другую. В конце пуска двигатель приобретает рабочую скорость, соответствующую его естественной характеристике и моменту сопротивления на его валу. На следующем рисунке приведена пусковая диаграмма (ПД) двигателя при пуске в две ступени ($m = 2$).

На этой диаграмме изображены участки характеристик, используемые в процессе пуска. Каждой характеристике соответствует определенное сопротивление якорной цепи. Горизонтальными отрезками прямых линий показывают замыкание соответствующей ступени пускового реостата, т.е. переключение двигателя с одной характеристики на другую.



Пусковая диаграмма ДПТ НВ

ПД характеризуется пределами изменения момента двигателя при пуске величинами M_1 и M_2 , а также числом пусковых ступеней m . Максимально возможное значение для M_1 определяется из предельно допустимого тока по коммутации на коллекторе: $M_{\text{дв}} \approx 2,5M_i$. Величина момента переключения M_2 должна превышать максимально возможное значение момента сопротивления. Для ДПТ НВ пусковую диаграмму и соответствующие ей ступени пускового реостата могут быть рассчитаны аналитически, если известны значение M_1 и число пусковых ступеней m . Полное сопротивление якорной цепи определяется при скорости, равной нулю, через ток якоря I_1 , соответствующий известному моменту M_1 :

$$R_{y1} = \frac{U}{I_1}.$$

При этом $R_{y1} = R_y + R_{a2} + R_{a1}$.

Следующее сопротивление якорной цепи равно:

$$R_{y2} = \frac{R_{y1}}{\lambda}, \text{ где } \lambda = \frac{I_1}{I_2} = \frac{M_1}{M_2}$$

При этом $R_{y2} = R_y + R_{a2}$.

Следовательно: $R_{a1} = R_{y1} - R_{y2}$; $R_{a2} = R_{y2} - R_y$.

При заданных величинах M_1 или I_1 и m однозначно определяются момент переключения M_2 и ток переключения I_2 :

$$M_2 = M_1 \sqrt[m]{\frac{R_y}{R_{y1}}}; \quad I_2 = I_1 \sqrt[m]{\frac{R_y}{R_{y1}}}$$

Как указывалось выше, момент переключения M_2 должен быть больше максимально возможного момента сопротивления. Если это условие не соблюдается, то число ступеней пуска m должно быть увеличено. При заданных значениях M_1 и M_2 число ступеней определяется по формуле:

$$m = \frac{\lg \frac{M_1}{M_2}}{\lg \frac{R_{y1}}{R_y}} = \frac{\lg \lambda}{\lg \frac{R_{y1}}{R_y}}.$$

Если же заданы величины M_2 или I_2 и m , то момент переключения M_1 и ток переключения I_1 также определяются однозначно:

$$M_1 = \left(M_2^m \cdot \frac{U}{R_y} \right)^{\frac{1}{m+1}}; \quad I_1 = \left(I_2^m \cdot \frac{U}{R_y} \right)^{\frac{1}{m+1}}.$$

Кривые переходного процесса при пуске для любой i -ой пусковой ступени строятся с использованием формул, записанных для скорости и момента в следующем виде:

$$\omega_i(t) = \omega_{\text{дв}i} + (\omega_{i\text{дв}} - \omega_{\text{дв}i}) e^{-\frac{t}{T_{ii}}};$$

$$M_i(t) = M_{\text{дв}i} + (M_1 - M_{\text{дв}i}) e^{-\frac{t}{T_{ii}}},$$

где

$T_{ii} = \frac{J}{\beta_i}$ – механическая постоянная времени привода, соответствующая i -й пусковой характеристике; J – приведенный момент инерции;

β_i – модуль жесткости i -й пусковой механической характеристики двигателя.

Из выражения для переходного момента определяется время работы двигателя на i -ой пусковой ступени при изменении момента от M_1 до M_2 :

$$t_i = T_{ii} \ln \frac{M_1 - M_{\tilde{n}}}{M_2 - M_{\tilde{n}}}.$$

При записи выражений для угловой скорости нужно учесть, что каждой ступени соответствуют свои значения начальной и установившейся скорости. Так, для I ступени $\omega_{i\dot{a}+1} = 0$, а $\omega_{\dot{a}\dot{n}1} = \omega_{1f}$.

Тема 5. Переходные процессы в электроприводах

Пример. Для двигателя постоянного тока независимого возбуждения, имеющего следующие паспортные данные : мощность на валу $P_{ном} = 2,2 \text{ кВт}$; напряжение $U_{ном} = 220 \text{ В}$; ток $I_{ном} = 13 \text{ А}$; частота вращения якоря $n_{ном} = 1000 \text{ об/мин}$; КПД $\eta_{ном} = 0,7$, рассчитать и построить:

- 1 кривые переходного процесса при пуске;
- 2 кривые переходного процесса при торможении.

Решение.

Номинальные угловая скорость и момент:

$$\omega_{ном} = \frac{2\pi \cdot n_{ном}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1000}{60} = 105 \text{ с}^{-1}$$

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{2200}{105} = 21 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Постоянная $c = k\Phi_{ном}$

$$c = \frac{M_{ном}}{I_{ном}} = \frac{21}{13} = 1,61 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$$

Сопротивление якоря и скорость холостого хода

$$R_{я} = \frac{U_{ном} - c \cdot \omega_{ном}}{I_{ном}} = \frac{220 - 1,61 \cdot 105}{13} = 3,92 \text{ Ом}$$

Расчет данных для построения кривых переходного процесса при пуске производится по уравнениям:

$$\omega = \omega_{уст} + (\omega_{нач} - \omega_{уст}) \cdot e^{-t/T_M}$$

$$i = I_c + (I_{нач} - I_c) \cdot e^{-t/T_M}$$

Расчет для первой ступени пуска /разгон по пусковой характеристике – 2/

Определяем значения токов

установившееся $I_c = I_{ном} = 13 \text{ A}$

начальное $I_{нач} = I_1 = 34,45 \text{ A}$

Определяем значения скорости двигателя

установившееся при $I_c = I_{ном} = 13 \text{ A}$

$$\omega_{уст1} = \omega_0 - I_c \cdot \frac{R_{я} + R_n}{c} = 136,6 - 13 \cdot \frac{3,92 + 2,47}{1,61} = 85 \text{ c}^{-1}$$

начальное $\omega_{нач1} = 0$

Определяем электромеханическую постоянную времени

$$T_{M1} = \frac{J \cdot (R_{я} + R_n)}{c^2} = \frac{0,223 \cdot (3,92 + 2,47)}{1,61^2} = 0,55 \text{ c}$$

Расчетные формулы для первой ступени пуска примут вид:

$$\omega = 85 + (0 - 85) \cdot e^{-t/0,55} = 85 \cdot \left(1 - e^{-t/0,55}\right) \text{ c}^{-1}$$

$$i = 13 + (34,45 - 13) \cdot e^{-t/0,55} = 13 + 21,45 \cdot e^{-t/0,55} \text{ A}$$

$t, \text{ c}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,54
$\omega, \text{ c}^{-1}$	0	14,13	25,9	35,74	43,93	50,75	53
$I, \text{ A}$	34,45	30,88	27,91	25,43	23,36	21,64	21,1

Расчет для второй ступени пуска /разгон по естественной характеристике – 1/.

Определяем значения скорости двигателя,

установившееся при $I_c = I_{ном} = 13 \text{ A}$

$$\omega_{уст2} = \omega_{ном} = 105 \text{ c}^{-1}$$

начальное при $I_1 = 34,45 \text{ A}$

$$\omega_{нач2} = \omega_0 - I_1 \cdot \frac{R_{я}}{c} = 136,6 - 34,45 \cdot \frac{3,92}{1,61} = 53 \text{ c}^{-1}$$
$$T_{M2} = \frac{J \cdot R_{я}}{c^2} = \frac{0,223 \cdot 3,92}{1,61^2} = 0,34 \text{ c}$$

Определяем электромеханическую постоянную времени

Расчетные формулы для второй ступени пуска примут вид:

Определяем время разгона на второй ступени пуска

Подставляя в расчетные формулы ряд значений t от $t_2 = 0$ до

$$\omega = 105 + (53 - 105) \cdot e^{-t/0,34} = 105 - 52 \cdot e^{-t/0,34} \text{ c}^{-1}$$

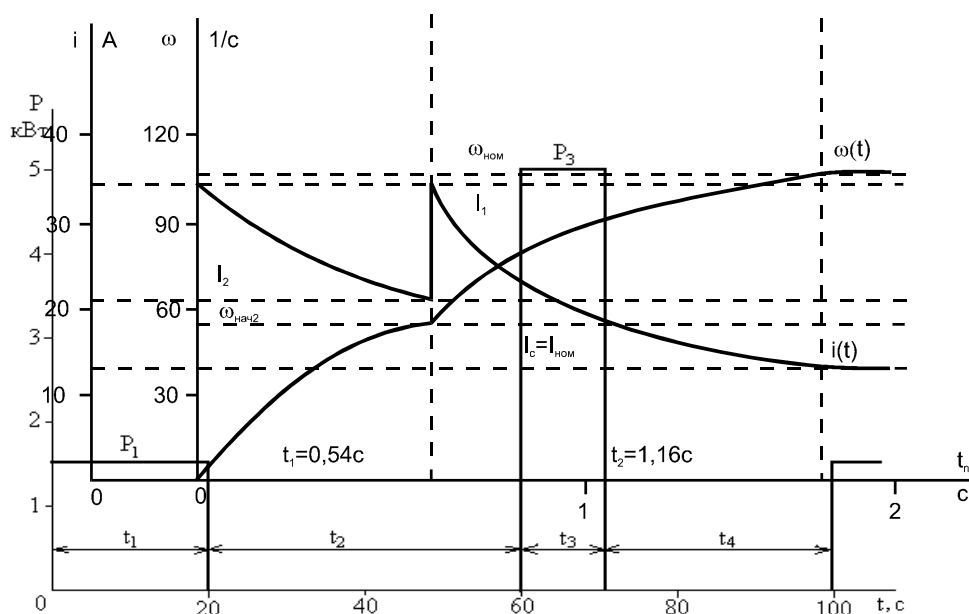
$$i = 13 + 21,45 \cdot e^{-t/0,34} \text{ A}$$

$$t_2 = 4 \cdot T_{M2} = 4 \cdot 0,34 = 1,16 \text{ c}$$

$t_2 = 1,16 \text{ c}$, получаем значения ω и i , которые сведены в таблицу 2.2

t_2, c	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,16
ω, c^{-1}	53	76,12	88,96	96,09	100,0	102,25	105
i, A	34,45	24,91	19,61	16,67	15,04	14,13	13

По данным расчета строим кривые переходного процесса при пуске $\omega = f(t)$ и $i = f(t)$, которые показаны на рисунке



Темыби7. Энергетика электроприводов и выбор электрических двигателей

Задача. Для нагрузочной диаграммы, показанной на рисунке 5.1 выбрать крановый асинхронный двигатель типа МТФ с синхронной частотой вращения $n_0 = 1000 \text{ об/мин}$ для сети $cU = 380 \text{ В}$. Выбранный двигатель проверить на перегрузку и на нагрев, если коэффициент потерь $a = 0,3$.

Решение.

1 Для выбора электродвигателя определим:

1.1 Эквивалентную мощность

$$P'_9 = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_3}} = \sqrt{\frac{2,5^2 \cdot 20 + 5^2 \cdot 10}{20 + 10}} = 3,54 \text{ кВт}$$

1.2. Продолжительность включения

$$ПВ\% = \frac{t_1 + t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4} \cdot 100\% = \frac{20 + 10}{20 + 40 + 10 + 30} \cdot 100\% = 30\%$$

1.3. Мощность электродвигателя, приведенная к нормативной $ПВ\% = 25\%$

$$P_3 = P'_3 \cdot \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_n}} = 3,54 \cdot \sqrt{\frac{30}{25}} = 3,87 \text{ кВт}$$

1.4. Выбираем (таблица 5.1) электродвигатель МТФ 111-6 с паспортными данными:

$$P_{ном} = 4,1 \text{ кВт}$$

$$I_1 = 10,4 \text{ А}$$

$$\eta_{ном} = 70\%$$

$$n_{ном} = 895 \text{ об/мин}$$

$$\cos \varphi = 0,73$$

$$M_k/M_{ном} = 1,9$$

2 Для проверки двигателя на перегрузочную способность определим:

2.1 Номинальный момент

$$M_{ном} = 9,55 \frac{P_{ном}}{n_{ном}} = 9,55 \frac{4,1 \cdot 10^3}{895} = 43,75 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

2.2 Критический момент

$$M_k = 1,9 \cdot M_{ном} = 1,9 \cdot 43,75 = 83,12 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

2.3 Частоту вращения на участке с наибольшей нагрузкой (3 участок с $P = 5 \text{ кВт}$). Для этого, считая рабочую часть механической характеристики линейной, составим пропорцию:

$$\frac{S_{ном}}{S_3} = \frac{P_{ном}}{P_3} \quad \text{или} \quad \frac{n_0 - n_{ном}}{n_0 - n_3} = \frac{P_{ном}}{P_3}, \text{ откуда}$$

$$n_3 = n_0 - \frac{P_3}{P_{ном}} (n_0 - n_{ном}) = 1000 - \frac{5}{4,1} (1000 - 895) = 872 \text{ об / мин}$$

2.4 Наибольший момент нагрузки

$$M_{3m} = 9,55 \frac{P_3}{n_3} = 9,55 \frac{5 \cdot 10^3}{872} = 54,76 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{3m} = 54,76 \text{ Н} \cdot \text{м} < M_k = 83,12 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Таким образом, двигатель выдержит нагрузку.

3 Для проверки электродвигателя на перегрев определим:

3.1. Номинальную мощность потерь

$$\Delta P_{ном} = K + V_{ном} = P_{ном} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{ном}} - 1 \right) = 4,1 \cdot \left(\frac{1}{0,7} - 1 \right) = 1,76 \text{ кВт}$$

3.2. Мощность постоянных потерь

$$K = \frac{a}{1+a} \cdot \Delta P_{ном} = \frac{0,3}{1+0,3} \cdot 1,76 = 0,41 \text{ кВт}$$

3.3. Номинальную мощность переменных потерь

$$V_{ном} = \frac{\Delta P_{ном}}{1+a} = \frac{1,76}{1+0,3} = 1,35 \text{ кВт}$$

3.4. Мощность потерь на участках

$$\Delta P_1 = K + V_{ном} \cdot \left(\frac{P_1}{P_{ном}} \right)^2 = 0,41 + 1,35 \cdot \left(\frac{2,5}{4,1} \right)^2 = 0,91 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_2 = K + V_{iii} \cdot \left(\frac{P_3}{P_{iii}} \right)$$

3.5. Мощность средних потерь

$$P'_{cp} = \frac{\Delta P_1 \cdot t_1 + \Delta P_3 \cdot t_3}{t_1 + t_3} = \frac{0,91 \cdot 20 + 2,42 \cdot 10}{20 + 10} = 1,41 \text{ кВт}$$

Мощность средних потерь, приведенная к нормативной $ПВ\% = 25\%$

$$\Delta P_{cp} = \Delta P'_{cp} \cdot \frac{ПВ}{ПВ_n} = 1,41 \cdot \frac{30}{25} = 1,7 \text{ кВт}$$

т.е. $\Delta P_{cp} = 1,7 \text{ кВт} < \Delta P_{ном} = 1,76 \text{ кВт}$ – двигатель будет

работать в нормальном тепловом режиме.

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Самостоятельная работа представляет собой особую, высшую степень учебной деятельности. Она обусловлена индивидуальными психологическими различиями обучающегося и личностными особенностями и требует высокого уровня самосознания, рефлексивности. Самостоятельная работа может осуществляться как во внеаудиторное время (дома, в лаборатории), так и на аудиторных занятиях в письменной или устной форме.

Самостоятельная работа обучающихся является составной частью учебной работы и имеет целью закрепление и углубление полученных знаний и навыков, поиск и приобретение новых

знаний, в том числе с использованием автоматизированных обучающих систем, а также выполнение учебных заданий, подготовку к предстоящим занятиям, зачетам и экзаменам. Организуется, обеспечивается и контролируется данный вид деятельности студентов соответствующими кафедрами.

Самостоятельная работа предназначена не только для овладения каждой дисциплиной, но и для формирования навыков самостоятельной работы вообще, в учебной, научной, профессиональной деятельности, способности принимать на себя ответственность, самостоятельно решить проблему, находить конструктивные решения, выход из кризисной ситуации и т. д. Значимость самостоятельной работы выходит далеко за рамки отдельного предмета, в связи с чем выпускающие кафедры должны разрабатывать стратегию формирования системы умений и навыков самостоятельной работы. При этом следует исходить из уровня самостоятельности абитуриентов и требований к уровню самостоятельности выпускников, с тем, чтобы за весь период обучения достаточный уровень был достигнут.

При проведении самостоятельной работы, связанной с проработкой теоретического материала, студентам предлагается законспектировать рассматриваемый вопрос, в случае необходимости задать возникшие вопросы на практическом занятии или на консультации.

При изучении дисциплины «Электромеханотроника» практикуются следующие виды и формы самостоятельной работы студентов:

- выполнение практических работ
- подготовка к устному опросу
- подготовка к тестированию
- подготовка к письменной контрольной работе, тестированию, контрольной точке.

Самостоятельная работа тесно связана с контролем (контроль также рассматривается как завершающий этап выполнения самостоятельной работы), при выборе вида и формы самостоятельной работы следует учитывать форму контроля.

Формы контроля при изучении дисциплины «Электромеханотроника»:

- устный опрос;
- контрольная работа;
- контрольная точка;
- письменная работа;
- тестирование.

Самостоятельная работа проводится в виде подготовительных упражнений для усвоения нового, упражнений при изучении нового материала, упражнений в процессе закрепления и повторения, упражнений проверочных и контрольных работ, а также для самоконтроля.

Для организации самостоятельной работы необходимы следующие условия:

- готовность студентов к самостоятельному труду;
- наличие и доступность необходимого учебно-методического и справочного материала;
- консультационная помощь.

Самостоятельная работа может проходить в лекционном кабинете, лаборатории, компьютерном зале, библиотеке, дома. Самостоятельная работа тренирует волю, воспитывает работоспособность, внимание, дисциплину и т.д.

Рекомендации по организации аудиторной самостоятельной работой

Аудиторная самостоятельная работа по дисциплине выполняется на учебных занятиях под непосредственным руководством преподавателя и по его заданию.

Основными видами аудиторной самостоятельной работы являются:

- выполнение практических работ по инструкциям; работа с литературой и другими источниками информации, в том числе электронными;
- само- и взаимопроверка выполненных заданий;

Выполнение практических работ осуществляется на практических занятиях в соответствии с графиком учебного процесса. Работа с литературой, другими источниками информации, в т.ч. электронными может реализовываться на лекционных и практических занятиях. Данные источники информации могут быть представлены на бумажном и/или электронном носителях, в том числе,

в сети Internet. Преподаватель формулирует цель работы с данным источником информации, определяет время на проработку документа и форму отчетности.

Само- и взаимопроверка выполненных заданий чаще используется на лекционном, практическом занятии и имеет своей целью приобретение таких навыков как наблюдение, анализ ответов сокурсников, сверка собственных результатов с эталонами.

Рекомендации по организации внеаудиторной самостоятельной работы

Внеаудиторная самостоятельная работа выполняется по заданию преподавателя, но без его непосредственного участия.

При предъявлении видов заданий на внеаудиторную самостоятельную работу рекомендуется использовать дифференцированный подход к уровню подготовленности обучающегося. Перед выполнением внеаудиторной самостоятельной работы преподаватель проводит консультацию с определением цели задания, его содержания, сроков выполнения, ориентировочного объема работы, основных требований к результатам работы, критериев оценки, форм контроля и перечня литературы. В процессе консультации преподаватель предупреждает о возможных типичных ошибках, встречающихся при выполнении задания.

Самостоятельная работа может осуществляться индивидуально или группами студентов в зависимости от цели, объема, конкретной тематики самостоятельной работы, уровня сложности, уровня подготовленности обучающихся.

Видами заданий для внеаудиторной самостоятельной работы могут быть:

– для овладения знаниями: чтение текста (учебника, первоисточника, дополнительной литературы); составление плана текста; графическое изображение структуры текста; конспектирование текста; выписки из текста; работа со словарями и справочниками; учебно-исследовательская работа; использование аудио- и видеозаписей, компьютерной техники и Интернет-ресурсов и др.;

– для закрепления и систематизации знаний: работа с конспектом лекции (обработка текста); повторная работа над учебным материалом (учебника, первоисточника, дополнительной литературы, аудио- и видеозаписей); составление плана и тезисов ответа; составление таблиц, глоссария для систематизации учебного материала; изучение словарей, справочников; ответы на контрольные вопросы; аналитическая обработка текста (аннотирование, рецензирование, реферирование, контент-анализ и др.); подготовка сообщений к выступлению на семинаре, конференции; подготовка рефератов, докладов; составление библиографии, заданий в тестовой форме и др.;

– для формирования умений: решение задач и упражнений по образцу; решение вариативных задач и упражнений; составление схем; проектирование и моделирование разных видов и компонентов профессиональной деятельности и др.

Для обеспечения внеаудиторной самостоятельной работы по дисциплине преподавателем разрабатывается перечень заданий для самостоятельной работы, который необходим для эффективного управления данным видом учебной деятельности обучающихся.

Преподаватель осуществляет управление самостоятельной работой, регулирует ее объем на одно учебное занятие и осуществляет контроль выполнения всеми обучающимися группы. Для удобства преподаватель может вести ведомость учета выполнения самостоятельной работы, что позволяет отслеживать выполнение минимума заданий, необходимых для допуска к итоговой аттестации по дисциплине.

В процессе самостоятельной работы студент приобретает навыки самоорганизации, самоконтроля, самоуправления и становится активным самостоятельным субъектом учебной деятельности.

Обучающийся самостоятельно определяет режим своей внеаудиторной работы и меру труда, затрачиваемого на овладение знаниями и умениями по каждой дисциплине, выполняет внеаудиторную работу по индивидуальному плану, в зависимости от собственной подготовки, бюджета времени и других условий.

Ежедневно обучающийся должен уделять выполнению внеаудиторной самостоятельной работы в среднем не менее 3 часов.

При выполнении внеаудиторной самостоятельной работы обучающийся имеет право обращаться к преподавателю за консультацией с целью уточнения задания, формы контроля выполненного задания.

Контроль результатов внеаудиторной самостоятельной работы студентов может проводиться в письменной, устной или смешанной форме с представлением продукта деятельности обучающегося. В качестве форм и методов контроля внеаудиторной самостоятельной работы могут быть использованы зачеты, тестирование, самоотчеты, контрольные работы, защита творческих работ и др.

Методические рекомендации по изучению дисциплины

Изучение теоретической части дисциплин призвано не только углубить и закрепить знания, полученные на аудиторных занятиях, но и способствовать развитию у студентов творческих навыков, инициативы и организовать свое время.

Самостоятельная работа при изучении дисциплин включает:

- чтение студентами рекомендованной литературы и усвоение теоретического материала дисциплины;

- знакомство с Интернет-источниками;

- подготовку к различным формам контроля (тесты, контрольные работы);

- подготовку и написание рефератов;

- выполнение контрольных работ;

- подготовку ответов на вопросы по различным темам дисциплины в той последовательности, в какой они представлены.

Планирование времени, необходимого на изучение дисциплин, студентам лучше всего осуществлять весь семестр, предусматривая при этом регулярное повторение материала.

Материал, законспектированный на лекциях, необходимо регулярно прорабатывать и дополнять сведениями из других источников литературы, представленных не только в программе дисциплины, но и в периодических изданиях.

При изучении дисциплины сначала необходимо по каждой теме прочитать рекомендованную литературу и составить краткий конспект основных положений, терминов, сведений, требующих запоминания и являющихся основополагающими в этой теме для освоения последующих тем курса. Для расширения знания по дисциплине рекомендуется использовать Интернет-ресурсы; проводить поиски в различных системах и использовать материалы сайтов, рекомендованных преподавателем.

При подготовке к контрольной работе необходимо прочитать соответствующие страницы основного учебника. Желательно также чтение дополнительной литературы. При написании контрольной работы ответ следует иллюстрировать схемами.

При выполнении самостоятельной работы по написанию реферата студенту необходимо: прочитать теоретический материал в рекомендованной литературе, периодических изданиях, на Интернет-сайтах; творчески переработать изученный материал и представить его для отчета в форме реферата, проиллюстрировав схемами, диаграммами, фотографиями и рисунками.

Тексты контрольных работ и рефератов должны быть изложены внятно, простым и ясным языком.

При ответе на экзамене необходимо: продумать и четко изложить материал; дать определение основных понятий; дать краткое описание явлений; привести примеры. Ответ следует иллюстрировать схемами, рисунками и графиками.

Методические рекомендации к выполнению контрольной работы

Контрольная работа является одной из составляющих учебной деятельности студента по овладению знаниями в области физиологии и биохимии растений. К ее выполнению необходимо приступить только после изучения тем дисциплины.

Целью контрольной работы является определения качества усвоения лекционного материала и части дисциплины, предназначенной для самостоятельного изучения.

Задачи, стоящие перед студентом при подготовке и написании контрольной работы:

1. закрепление полученных ранее теоретических знаний;

2. выработка навыков самостоятельной работы;

3. выяснение подготовленности студента к будущей практической работе.

Контрольные выполняются студентами в аудитории, под наблюдением преподавателя. Ключевым требованием при подготовке контрольной работы выступает творческий подход, уме-

ние обрабатывать и анализировать информацию, делать самостоятельные выводы, обосновывать целесообразность и эффективность предлагаемых рекомендаций и решений проблем, чётко и логично излагать свои мысли. Подготовку контрольной работы следует начинать с повторения соответствующего раздела учебника, учебных пособий по данной теме и конспектов лекций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

а) основная литература:

1. Гольдберг, О.Д. Электромеханика: учебник для студ. высш. учеб. заведений/ О.Д. Гольдберг, С.П. Хелемская; под ред. О.Д. Гольдберга – М.: Издательский центр «Академия», 2010. –512 с.
2. Епифанов, А. П. Электрические машины [Электронный ресурс] : учеб. / А. П. Епифанов. - М. : Лань, 2006. - 272 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/view/book/591/> - ЭБС «Лань»

б) дополнительная литература:

1. Копылов, И.П. Электрические машины: Учеб. для вузов/ И.П. Копылов. – М.: Высш. шк., 2009.– 607 с.
2. Вольдек, А.И. Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов /А.И.Вольдек, В.В.Попов. – СПб.: Питер, 2008. – 350 с.
3. Вольдек, А.И. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учебник для вузов/ А.И.Вольдек, В.В.Попов. – СПб.: Питер, 2008. – 320 с.
4. Читечян В.И. Электрические машины. Сборник задач/ В.И.Читечян. – М.: Высшая школа, 1988.- 232 с.
5. Кацман, М.М. Электрические машины [Текст] : Учебник: Рек. Мин. обр. РФ / М.М.Кацман. - 4-е изд., перераб. и доп. - М. : Высш. шк., 2003. - 470 с.
6. Белов, М. П. Автоматизированный электропривод производственных механизмов и технологических комплексов [Текст] : учеб.: рек. Мин. обр. РФ / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. - 2-е изд., стер. - М. : Академия, 2004. - 576 с.
7. Терехов В.М. Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш. учеб. заведений/ В.М. Терехов, О.И. Осипов; Под ред. В.М. Терехова. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. –304 с.
8. Онищенко Г.Б. Электрический привод: учебник для студ. высш. учеб. заведений/ Г.Б. Онищенко. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. –288 с.
9. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений/ Г.Г. Соколовский. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. –272 с.