

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

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

сборник учебно-методических материалов для направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Благовещенск, 2017

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

Составитель: Штыкин М.Д.

Электрический привод: сборник учебно-методических материалов для направления подготовки 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2017.

©Амурский государственный университет,
2017
©Кафедра автоматизации производственных
процессов и электротехники, 2017
©Штыкин М.Д., составитель

Содержание

Введение	4
1. Краткий курс лекций	5
2. Методические рекомендации к практическим занятиям	14
3. Методические рекомендации для самостоятельной работы студентов	17
Библиографический список	20

ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

- научиться составлять математические модели и схемы управления электрическими машинами и описывать переходные процессы в них;

- усвоить теоретический материал по электроприводам асинхронным и постоянного тока; изучить все виды торможения в электроприводе;

- изучить основные характеристики, методы исследования и основы расчета, усвоить вопросы испытания и эксплуатации электрических машин в составе электропривода.

В результате изучения дисциплины обучающиеся должны:

Знать

устройство, принцип действия и основные характеристики электрических машин; способы пуска, торможения и регулирования скорости электрических двигателей; способы управления координатами в различных типах электропривода.

Уметь

выбирать электрические машины для конкретных условий; определять параметры и выполнять расчеты основных типов и электрических машин в составе конкретного привода.

Владеть

навыками проведения экспериментов с электрическими машинами для снятия их основных характеристик и выбора для конкретного привода (особенно по тепловым режимам).

КРАТКИЙ КУРС ЛЕКЦИЙ

Электропривод постоянного тока

Для получения простейшей модели электропривода постоянного тока, описывающей статические режимы и позволяющей получить основные характеристики, используют схему на рис.1. Якорная цепь питается от независимого источника с напряжением U^* , сопротивление цепи якоря R постоянно, магнитный поток Φ определяется током возбуждения и не зависит от нагрузки, индуктивные параметры цепей пока не учитываются, поскольку рассматриваются лишь установившиеся (статические) режимы.

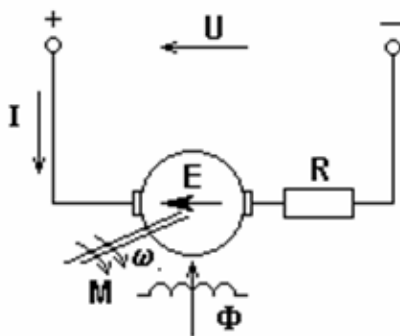


Рис. 1. Схема электропривода с двигателем постоянного тока

Взаимодействие тока I в обмотке якоря с магнитным потоком Φ , создаваемым обмотками, расположенными на полюсах машины, приводит в соответствии с законом Ампера и возникновению электромагнитных сил, действующих на активные проводники обмотки и, следовательно, электромагнитного момента M :

$$M = k\Phi I \quad (1)$$

где k - конструктивный параметр машины.

В движущихся с угловой скоростью ω в магнитном поле под действием момента M проводниках обмотки якоря в соответствии с законом Фарадея наводится ЭДС вращения E :

$$E = k\Phi\omega, \quad (2)$$

направленная в рассматриваемом случае встречно по отношению к вызвавшей движение причине – ЭДС источника питания U .

В соответствии со вторым законом Кирхгоффа для якорной цепи машины справедливо уравнение:

$$U - E = IR. \quad (3)$$

Представленные выше уравнения это простейшая, но достаточная для понимания главных процессов в электроприводе постоянного тока модель. Для решения практических задач они должны быть дополнены уравнением движения с моментом потерь ΔM , входящим в M_c ,

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$$

и уравнениями цепи возбуждения для конкретной схемы электропривода.

При возрастании M_c скорость двигателя начнет снижаться, значит уменьшится и ЭДС (полагают, что Φ , а также U и R – постоянные). Из третьего выражения следует, что

$$I = \frac{U - E}{R}$$

следовательно, ток вырастет, обусловив тем самым рост момента. Двигатель автоматически, без каких-либо внешних воздействий перейдет в новое установившееся состояние. Эти процессы будут иметь место при любых величинах и знаках M_c , то есть ЭДС будет выполнять функцию регулятора как в двигательном, так и в тормозных режимах работы машины.

Характеристики и режимы при независимом возбуждении

$$U = const$$

При использовании в электроприводе постоянного тока двигателя с независимым возбуждением – рис.2 с питанием от источника напряжения $U = const$ уравнение *электромеханической характеристики* $w(I)$ получится подстановкой (2) в (3) и решением относительно ω :

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi} \tag{4}$$

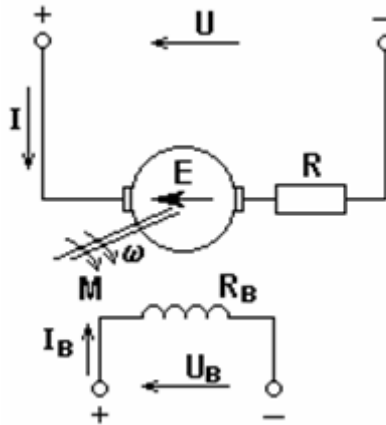


Рис. 2. Схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения
Механическую характеристику $w(M)$ получим, подставив в (4) ток, выраженный из (1):

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR}{(k\Phi)^2} \tag{5}$$

При заданных U , Φ и R уравнения (4) и (5) однозначно определяют связь между ω , I и M в любых режимах. Характеристики $\omega(M)$ и $\omega(I)$ это прямые линии, проходящие через две характерные точки: $M = 0$, $\omega = \omega_0$ и $w = 0$, $I = I_{кз}$, $M = M_{кз}$; при $\Phi = const$ они различаются лишь масштабами по оси абсцисс.

Скорость $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$ (рис.3) соответствует *режиму идеального холостого хода*: $M = 0$, $E = U$ и направлены встречно.

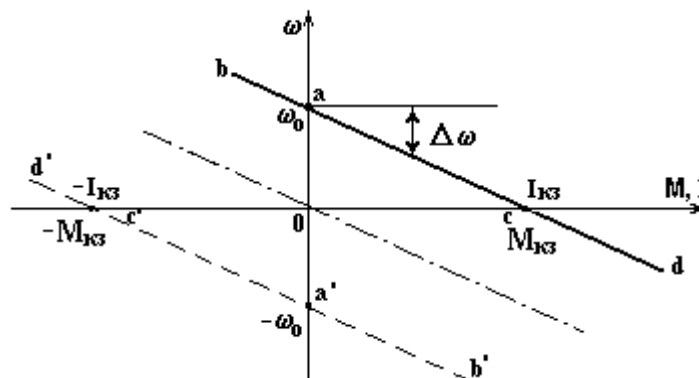


Рис. 3. Механические (электромеханические) характеристики электропривода постоянного тока независимого возбуждения при $U = const$

$$\Delta\omega = \frac{MR}{(k\Phi)^2}$$

Величина – перепад скорости под влиянием нагрузки.

Увеличением нагрузки при определенных условиях, которые рассматриваются ниже, можно прир-

ти к режиму короткого замыкания: $\omega = 0$, $I = \frac{U}{R} = I_{кз}$, $M = k \Phi I_{кз} = M_{кз}$.

При изменении полярности U характеристика займет положение, показанное на рис. 3.3 пунктиром.

Участки характеристики между $\omega 0$ и $M_{кз}$, где знаки ω и M совпадают, соответствуют, как было условлено ранее, *двигательному режиму* работы; участки с разными знаками ω и M – *тормозным режимам*.

Тормозные режимы – это генераторные режимы, поскольку механическая энергия, поступившая с вала машины, преобразуется в электрическую и передается через электрические зажимы машины. В зависимости от того, куда поступает электрическая энергия, различают три тормозных режима.

а) Торможение с отдачей энергии в сеть (рекуперативное) или генераторный режим работы параллельно с сетью

Если якорь двигателя вращать от некоторого постороннего источника со скоростью, превышающей скорость идеального холостого хода, то ЭДС двигателя будет больше приложенного напряжения, в результате чего ток в якоре двигателя и момент изменят свой знак. Механическая энергия, поступающая при этом на вал двигателя, преобразуется в электрическую и за вычетом потерь в двигателе рекуперируется в сеть.

На механических характеристиках торможению с отдачей энергии в сеть соответствуют участки ab и $a'b'$ (рис. 3)

б) Торможение противовключением или генераторный режим работы последовательно с сетью

В режиме противовключения изменяет знак скорость двигателя при сохранении знака момента или знак момента двигателя при сохранении знака скорости.

Первый случай имеет место при воздействии активного момента статической нагрузки, превышающего момент короткого замыкания на данной характеристике.

В результате изменения знака скорости ЭДС двигателя будет совпадать с приложенным напряжением, и ток в якоре определится выражением:

$$I = \frac{U + E}{R}$$

Второй случай используется для остановки двигателя путем изменения полярности напряжения, подводимого к его якору.

Вследствие механической инерции скорость двигателя и ЭДС в начальный момент сохраняются неизменными, а ток будет равен:

$$I = \frac{-U - E}{R}$$

На механических характеристиках (рис. 3) торможению противовключением соответствуют участки cd и $c'd'$.

В режиме торможения противовключением энергии поступает в привод и со стороны механизма, и от сети и рассеивается в сопротивлениях якорной цепи; в предыдущем случае энергия, поступающая от механизма, передавалась в сеть.

в) Динамическое торможение или генераторный режим работы независимо от сети

Если якорная цепь отключена от источника питания и замкнута на внешний резистор, то при вращении двигателя от внешнего источника или по инерции в якорной цепи индуцируется ЭДС и

$$I = -\frac{E}{R}$$

протекает ток, создающий момент. Характеристики проходят через начало координат – штрих-пунктир на рис. 3.

Характеристики и режимы при независимом возбуждении

$$I = \text{const}$$

В ряде применений якорная цепь двигателя постоянного тока независимого возбуждения питается не от источника напряжения, как в предыдущем случае, а от источника тока ($I = \text{const}$) – рис. 4. При этом, естественно, сохраняют силу фундаментальные соотношения (1)-(3), однако свойства электропривода радикально изменяются.

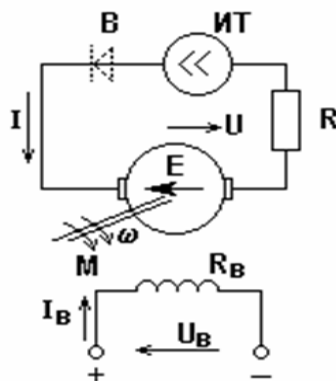


Рис.4. Схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения при питании от источника тока

Электромеханическая $\omega(I)$ и механическая $\omega(M)$ характеристики представлены теперь вертикальными прямыми (рис. 5)

$$I = \text{const} \quad (6)$$

$$M = k\Phi I = \text{const} \quad (7)$$

и привод приобретает новое свойство “источника момента”. Это связано с тем, что источник питания – источник тока – нейтрализует действие ЭДС, она теперь уже не играет роли внутреннего регулятора и не влияет на скорость. В свою очередь, напряжение U становится зависимой переменной

$$U = E + IR = k\Phi\omega + IR, \quad (8)$$

и характеристика $\omega(U)$ (рис. 5) определяет энергетические режимы работы электропривода.

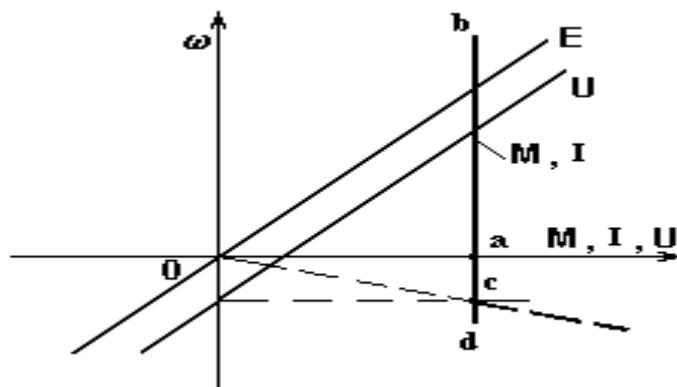


Рис. 5. Характеристики электропривода при питании якоря от источника тока

Режима идеального холостого хода в рассматриваемой структуре нет. Двигательный режим соответствует участку ab в I квадранте: $M\omega > 0$, т.е. механическая энергия поступает к потребителю – технологической машине, $UI > 0$ – электрическая энергия поступает к своему потребителю – двигателю. Режим короткого замыкания – точка a , здесь $E = 0$ и $U = IR$. На участке ac $M\omega < 0$, т.е. механическая энергия поступает от технологической машины и, преобразуясь в электрическую, передается в якорную цепь; по-прежнему $IU > 0$ – электрическая энергия от источника тока также

поступает в якорную цепь. Этот режим мы определили раньше как торможение противовключением. В точке с $U = 0$ – режим динамического торможения: вся поступившая механическая энергия рассеивается в сопротивлениях якорной цепи. На участке cd $M\omega < 0$ и $UI < 0$ – рекуперативное торможение, если источник тока позволяет передать энергию в сеть. Если источник тока обладает односторонней проводимостью (пунктир на рис.4) этого режима не будет, и электропривод будет продолжать работать в режиме динамического торможения (пунктир на рис. 5). Аналогично на основании соответствующей литературы могут быть самостоятельно рассмотрены другие режимы электрического привода:

- торможение с отдачей энергии в сеть (рекуперативное) или генераторный режим работы параллельно с сетью;
- торможение противовключением или генераторный режим работы последовательно с сетью;
- динамическое торможение или генераторный режим работы независимо от сети.

Электропривод переменного тока

Асинхронная машина с короткозамкнутым ротором

Регулирование координат

Двигатели с короткозамкнутым ротором – самые распространенные электрические машины – прежде использовались лишь в нерегулируемом электроприводе поскольку практически единственная возможность эффективно регулировать скорость – изменять частоту напряжения, приложенного к статорным обмоткам, была технически трудно реализуема. Благодаря успехам электроники, ситуация кардинально изменилась, и частотно-регулируемый электропривод – рис. 6а) стал основным типом регулируемого электропривода.

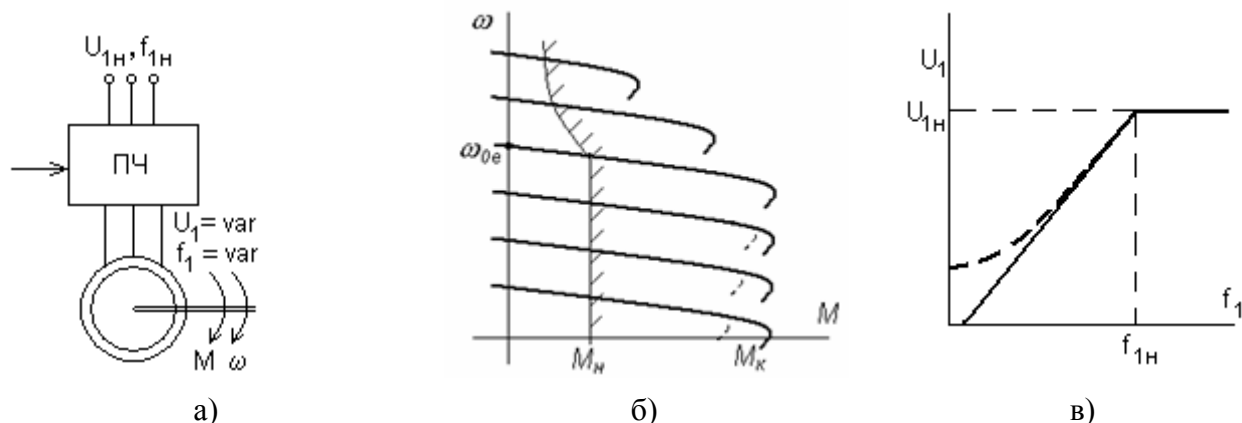


Рис. 6. Схема частотно-регулируемого электропривода (а), механические характеристики (б), зависимость напряжения от частоты (в)

Частотное регулирование.

Угловая частота ω_0 пропорциональна частоте $f1$ и не зависит для данной машины от каких-либо других величин. Вместе с тем, изменяя $f1$, следует заботиться об амплитуде напряжения: при уменьшении $f1$ для сохранения магнитного потока на некотором, например, номинальном уровне в соответствии с (4.4) следует изменять $E_1 \approx U_1$ так, чтобы

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

При увеличении частоты от номинальной при $UI = UIн$ поток будет уменьшаться. В пренебреже-

нии $R1$, т.е. в предположении, что $E1 \gg UI$, критический момент также пропорционален $\frac{U_1}{f_1}$, тогда как критическое скольжение $Sк$ обратно пропорционально $f1$.

Механические характеристики при частотном регулировании в предположении, что $E1 = UI$, показаны на рис. 6 б).

Сопротивление цепи статора, которым мы пренебрегаем, оказывает влияние на характеристики

особенно малых машин (киловатты) – пунктир на рис. 4.8,б, поскольку при снижении частоты $E1 < u1 < em = \dots$. Для компенсации этого влияния обычно несколько увеличивают напряжение при низких частотах – пунктир на рис. 6 в).

Проведем оценку частотного регулирования скорости по введенным ранее показателям

$$U_1 / f_1 \approx const$$

1. Регулирование двухзонное – вниз ($U_1 = U_{1H}, f_1 > f_{1H}$) и вверх ($U_1 = U_{1H}, f_1 < f_{1H}$) от основной скорости.
2. Диапазон регулирования в разомкнутой структуре (8-10):1. Стабильность скорости – высокая.
3. Регулирование плавное.
4. Допустимая нагрузка – $M = M_H$ при регулировании вниз от основной скорости ($\Phi \gg const$), $P = P_H$ при регулировании вверх ($\Phi < \Phi_H$).
5. Способ экономичен в эксплуатации – нет дополнительных элементов, рассеивающих энергию; как будет показано далее, малы потери в переходных процессах. Несомненное достоинство – гибкость управления координатами в замкнутых структурах. Современные методы так называемого векторного управления обеспечивают частотно-регулируемому электроприводу практически те же свойства по управляемости, которые имеет самый совершенный электропривод постоянного тока.
6. Способ требует использования преобразователя частоты (ПЧ) – устройства, управляющего частотой и амплитудой выходного напряжения. Такие устройства – совершенные и недорогие доступны в последнее время для решения задач автоматического электропривода.

Параметрическое регулирование

Отсутствие прежде доступного и качественного преобразователя частоты приводило к поиску других решений, одно из которых – изменение U_1 при $f_1 = f_{1H} = const$ – рис. 7 а).

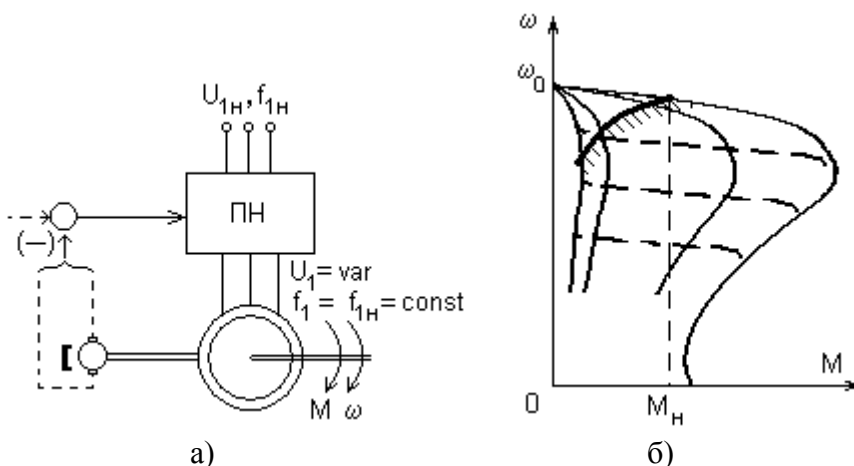


Рис. 7. Схема (а) и механические характеристики (б) асинхронного электропривода с параметрическим регулированием

Критический момент при таком регулировании будет снижаться пропорционально U_1^2 , критическое скольжение останется неизменным – сплошные линии на рис. 7 б). В замкнутой по скорости структуре – пунктир на рис. 7а) – можно получить характеристики, показанные на рис. 7 б) пунктиром, т.е. способ внешне выглядит весьма привлекательно. Проведем его оценку.

1. Регулирование однозонное – вниз от основной скорости
2. Диапазон регулирования в замкнутой структуре (3-4):1; стабильность скорости удовлетворительная.
3. Плавность высокая.
4. Допустимая нагрузка резко снижается с уменьшением скорости, поскольку магнитный поток $\Phi \propto U_1$ при $f_1 = const$. Рассмотрим это важное обстоятельство подробнее, воспользовавшись выражением для потерь в роторной цепи (4.9). Допустимыми в продолжительном режиме потеря-

ми можно считать номинальные $\Delta P_{2н} = M_n \omega_0 s_n$, допустимые потери при регулировании определяются как $DP_{доп} = M_{доп} \omega_0 s$. Приравняв выражения для потерь, получим

$$M_{доп} = \frac{M_n s_n}{s}$$

т.е. даже для специального двигателя с повышенным скольжением (очевидно невыгодного) $s_n \phi = 0,06$ вместо стандартного $s_n = 0,03$ снижение скорости всего на 20% ($s = 0,2$) потребует снижения момента в 3 раза – рис. 4.9,б.

5. Таким образом, рассмотренный способ регулирования неэффективен для использования в продолжительном режиме. Даже для самой благоприятной нагрузке – вентиляторной ($M \equiv \omega^2$) необходимо двух-трехкратное завышение установленной мощности двигателя с повышенным скольжением, интенсивный внешний обдув.

Способ регулирования скорости изменением напряжения может в ряде случаев использоваться для кратковременного снижения скорости, а система ПН-АД очень полезна и эффективна для снижения пусковых токов, для экономии энергии при недогрузках.

6. Преобразователь напряжения ПН – простое устройство в 3-4 более дешевое, чем преобразователь частоты, и именно эта особенность системы ПН-АД приводила в ряде случаев к её неоправданному применению.

Кроме изложенных способов регулирования координат двигателей с короткозамкнутым ротором для этой цели используются иногда специальные двигатели с переключением обмоток статора, изменяющим число пар полюсов, т.е. ступенчато регулирующие ω_0 . Эти двигатели тяжелы, дороги, привод требует дополнительной переключающей аппаратуры и в связи с этим проигрывает современному частотно-регулируемому электроприводу.

Асинхронные двигатели с фазным ротором Регулирование координат

Дополнительные возможности управлять координатами асинхронного электропривода появляются, если ротор выполнен не короткозамкнутым, а фазным, т.е. если его обмотка состоит из катушек, похожих на статорные, соединенных между собой и выведенных на кольца, по которым скользят щетки, связанные с внешними устройствами. Схематически трехфазная машина с фазным ротором показана на рис. 8 а). Фазный ротор обеспечивает дополнительный канал, по которому можно воздействовать на двигатель, – в этом его очевидное достоинство, но очевидна и плата за него: существенное усложнение конструкции, бóльшая стоимость, наличие скользящих контактов. Именно эти негативные особенности привели к тому, что в общем объеме производства асинхронные двигатели с фазным ротором составляют небольшую долю.

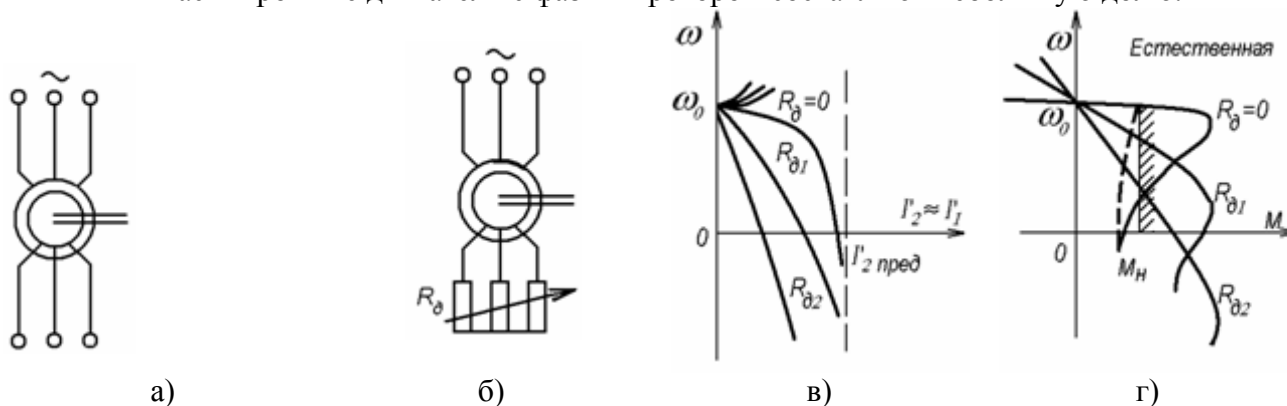


Рис. 8 Асинхронный двигатель с фазным ротором (а), схема (б) и характеристики (в) и (г) реостатного регулирования

К щеткам на кольцах в цепи ротора можно подключать как пассивные цепи, например, резисторы,

так и активные, содержащие источники энергии; последняя возможность широко используется в электроприводах большой мощности (сотни – тысячи киловатт).

Реостатное регулирование

Как и в электроприводе постоянного тока это простейший способ регулирования: в каждую фазу ротора включают одинаковые резисторы с сопротивлением R_d – рис. 8 б). Тогда общее активное сопротивление фазы ротора составит $R_2 = R_p + R_d$, а искусственные характеристики приобретут вид, представленный на рис. 8 в,г. Критический момент M_k не изменяется, а S_k растет пропорционально R_2 :

$$\frac{s_{к.и}}{s_{к.е}} = \frac{R'_p + R'_d}{R'_p} = \frac{R_p + R_d}{R_p}$$

Последнее соотношение для критического скольжения, очевидно, выполняется и для скольжения при любом $M = \text{const}$, оно похоже на (3.16), а реостатные механические характеристики похожи на таковые для двигателя постоянного тока. Показатели реостатного регулирования скорости асинхронных двигателей с фазным ротором практически те же, что у электропривода постоянного тока.

1. Регулирование однозонное – вниз от основной скорости.
2. Диапазон регулирования (2-3):1, стабильность скорости низкая.
3. Регулирование ступенчатое. С целью устранения этого недостатка иногда используются схемы, в которых роторный ток выпрямляется и сглаживается реактором, а резистор, включаемый за выпрямителем, шунтируется управляемым ключом – транзистором с управляемой скважностью, благодаря чему достигается плавность регулирования, а при использовании обратных связей формируются жесткие характеристики.
4. Допустимая нагрузка $M_{доп} = M_n$, поскольку $\Phi \gg \Phi_n$ и при мало меняющемся $\cos \varphi_2 I_{2доп} \gg I_{2n}$.
5. С энергетической точки зрения реостатное регулирование в асинхронном электроприводе столь же неэффективно, как и в электроприводе постоянного тока – потери в роторной цепи при $M = \text{const}$ пропорциональны скольжению:

$$\Delta P_2 = P_1 s,$$

а распределение этих потерь определяется соотношением сопротивлений – собственно в роторной

$$\Delta P_p = P_1 s \frac{R_p}{R_p + R_d},$$

обмотке рассеивается мощность

$$\Delta P_d = P_1 s \frac{R_d}{R_p + R_d}.$$

ность

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором уже более 120 лет используется и будет использоваться как практически единственная реализация массового нерегулируемого электропривода, составляющего прежде более 90% всех промышленных электроприводов.

Переход от нерегулируемого электропривода к регулируемому во многих технологиях рассматривается как основное направление развития электропривода, поскольку при этом существенно повышается качество технологических процессов и экономится до 30% электроэнергии. Это определяет перспективы развития частотно-регулируемого электропривода.

Электропривод с двигателями с фазным ротором при реостатном регулировании традиционно находит широкое применение в крановом хозяйстве, используется в других технологиях. Каскадные схемы и машины двойного питания можно встретить в мощных электроприводах газоперекачивающих станций с небольшим диапазоном регулирования.

Синхронные двигатели до недавнего времени использовались относительно редко – главным образом в мощных установках, где не требовалось регулирование скорости. В последние годы положение существенно изменилось: за счет современных материалов (постоянные магниты),

средств управления (ключи на относительно большие токи и напряжения и т.д.) Электропривод с синхронными двигателями стал управляемым, существенно расширился диапазон мощностей и занял ведущие позиции в станкостроении, робототехнике, гибких производственных системах и т.п. Свойство синхронной машины с обмоткой возбуждения менять реактивную мощность и ее знак позволяет использовать ее как управляемый компенсатор реактивной мощности.

Как отмечалось, практически единственным рациональным способом регулирования скорости асинхронных двигателей с К.З. ротором и синхронных двигателей является изменение частоты питающего напряжения.

Большинство современных преобразователей частоты (ПЧ) от долей кВт до сотен кВт построены одинаково – рис. 9: сеть переменного тока – неуправляемый выпрямитель В – шины постоянного тока - конденсатор LC-фильтра – автономный инвертор напряжения И с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) – асинхронный двигатель АД, к которому приложено переменное 3-фазное напряжение с регулируемой частотой $f = \text{var}$ и амплитудой $U = \text{var}$; управление инвертором осуществляется блоком управления БУ.

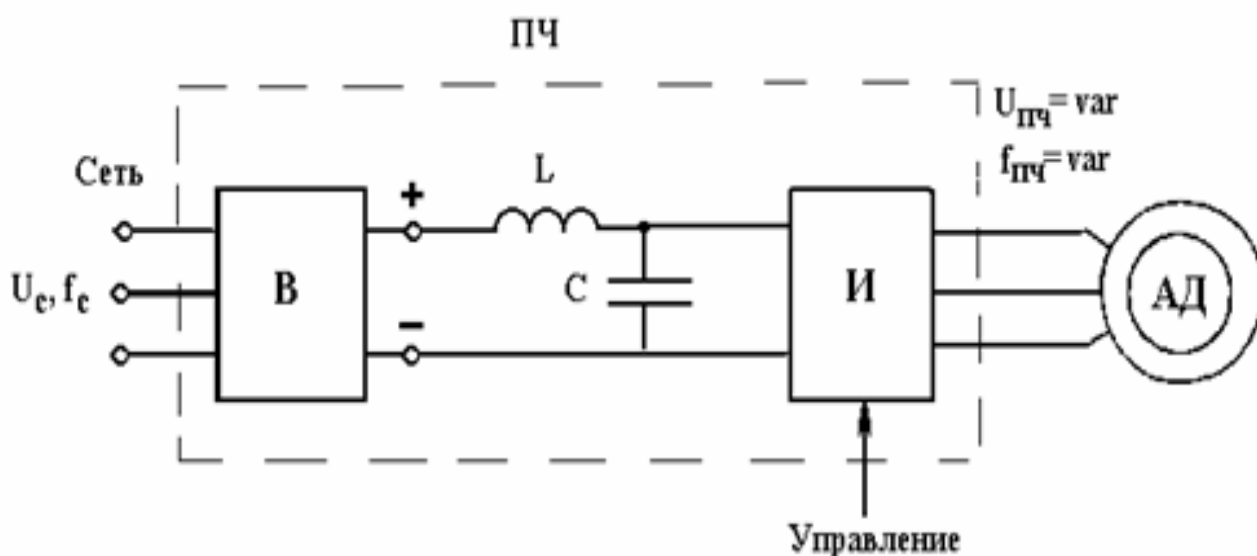


Рис. 9. Типовая схема преобразователя частоты

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 приступать после прочтения теоретического материала, изложенного на лекциях и в рекомендуемой литературе. При возникновении затруднений с выполнением заданий необходимо проконсультироваться у преподавателя. Далее по каждой теме приводится по одному примеру или одной задаче для демонстрации разделов дисциплины «Электрический привод».

Пример 1.

- Начертить схему включения и построить пусковую диаграмму двигателя постоянного тока независимого возбуждения.
- Произвести расчет сопротивлений пускового реостата.

Табл. 1. Исходные данные для построения пусковой диаграммы

Вариант	Номинальная мощность P_n , кВт	Номинальное напряжение U_n , В	Номинальная частота вращения n , об/мин	Коэффициент полезного действия о.е.
1	22	110	1470	0,75
2	28	22	1450	0,71
3	32	44	1420	0,72
4	16	110	1430	0,74
5	18	220	1460	0,76
6	22	440	1480	0,72
7	20	110	1440	0,73

Методические рекомендации для выполнения задачи.

Для ограничения тока при пуске двигателей постоянного тока, когда э. д. с. якоря $E=0$, необходимо в цепь якоря вводить токоограничивающее сопротивление. Устройство, служащее для введения и выведения сопротивления в цепи якоря в период пуска и разгона электропривода, называется пусковым реостатом.

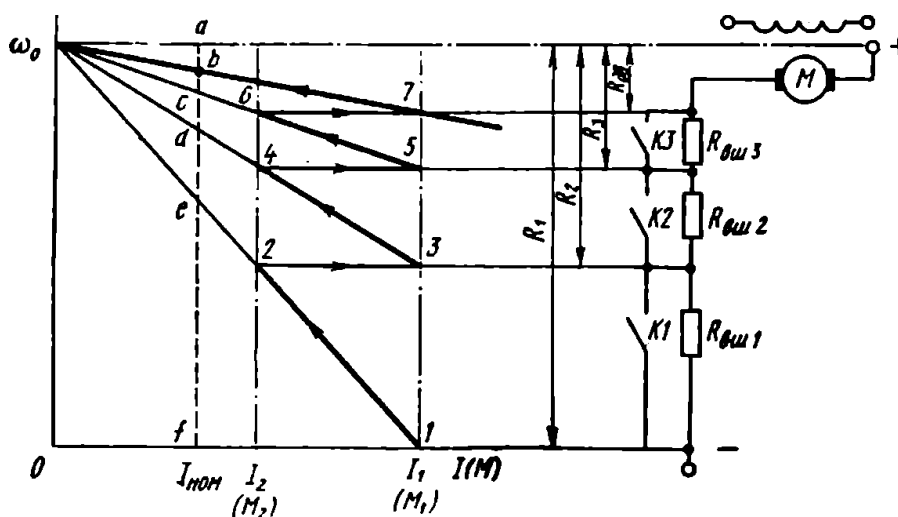


Рис. 1. Схема включения и пусковые реостатные характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Введение и выведение сопротивлений производится ступенчато (секциями). Такой же реостат используют и для регулирования угловой скорости двигателя, но тогда он называется регулировочным.

Пусковые сопротивления. Для пуска и торможения электроприводов требуются определенные значения моментов. Их определяют соответствующим расчетом сопротивлений в силовой цепи двигателя. Рассматриваемые ниже методы расчетов справедливы для номинальных значений питающего напряжения и магнитного потока.

Графо-аналитический метод. Схема включения и пусковые реостатные характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения показаны на рис. 1. Там же приведены обозначения расчетных величин. Сопротивления R_1, R_2, R_3 называются сопротивлениями ступеней; сопротивления $R_{вш1}, R_{вш2}, R_{вш3}$ — сопротивлениями секций. Наибольшее значение тока I_1 (момента M_1) при пуске ограничивается требованием допустимой коммутации тока якоря и для двигателей общего назначения принимается равным

$$I_{\max} = I_1 = (2,0 + 2,5)I_{\text{ном}}$$

В ряде случаев максимальный пусковой ток на первой реостатной характеристике ограничивается не условиями коммутации, а допустимым пусковым моментом или ускорением.

Минимальное значение тока I_2 (момента M_2) при шунтировании секций пускового реостата определяется статической нагрузкой и в условиях нормального пуска принимается равным

$$I_{\min} = I_2 = (1,1 + 1,2)I_{\text{ст}}$$

Ток I_2 называется током переключения.

Если требуется повышенная плавность пуска, то минимальное значение пускового тока (момента) принимается большим, чем при нормальных условиях, но это влечет за собой увеличение числа пусковых ступеней.

Построение пусковой диаграммы статических характеристик производится в следующем порядке (рис. 1):

- 1) строится естественная характеристика, для которой параметры определяются по формулам в итоге находятся координаты двух точек: ω_0 при $I=0$ и $\omega_{\text{ном}}$ при $I_{\text{ном}}$; через эти точки проводится прямая линия;
- 2) задаются токами I_1 и I_2 (M_1 и M_2) в пределах указанных выше значений;
- 3) строится первая реостатная характеристика, которая проводится через точки 1 и шо;

4) строятся реостатные характеристики последующих ступеней, для чего из точек 2, 4, 6 проводятся горизонтальные линии до пересечения с вертикалью I1(M1) в точках 3, 5, 7. Через точки пересечения в точку ω0 проводятся реостатные характеристики.

Построение считается удачным, если выход на естественную характеристику происходит в точке 7 на линии I1(M1). В противном случае изменяют пределы I1 и I2.

В соответствии с характеристикой 1—2 угловая скорость двигателя увеличивается до значения, определяемого положением точки 2. При этой скорости шунтируется первая секция реостата (замыкается контакт K1). Угловая скорость двигателя из-за инерции механической системы электропривода не может измениться мгновенно, а момент быстро растет, поэтому переход на новую характеристику практически осуществляется по линии, параллельной оси абсцисс.

Далее двигатель будет ускоряться соответственно прямой 3—4 до точки 4, и когда замкнется контакт K2, произойдет переход на следующую характеристику. После замыкания K3 наступит последний этап пуска двигателя, т. е. переход на естественную характеристику. Если при пуске статический момент на валу двигателя соответствует номинальному, то двигатель по окончании пуска работает на естественной характеристике с угловой скоростью ωном.

При графо-аналитическом методе расчета пусковых сопротивлений с прямолинейными электромеханическими или механическими характеристиками отрезков

0 — ω0 (рис. 1) в масштабе сопротивления принимается равным Rном. Тогда отрезки, отсекаемые реостатными характеристиками на вертикальной линии номинального тока (или момента), будут представлять собой сопротивления секций и ступеней пускового реостата.

Если ординату af, равную Rном в относительных единицах, принять равной единице (af=1), то ординаты ae, ad, ac, ab равны соответственно сопротивлениям пусковых ступеней якорной цепи двигателя R1, R2, R3. Вычитанием из указанных ординат внутреннего сопротивления двигателя, отмеченного отрезком ab, получаем сопротивления отдельных ступеней (соответствующие ординаты be, bd и bc).

Для перехода от сопротивлений, выраженных в относительных единицах, к сопротивлениям, выраженным в омах, производится соответствующий перерасчет:

$$R_{1-3} = R * R_{ном}$$

где $R^* = ae/af = ad/af + ac/af$.

Отдельные секции реостата Rвш1, Rвш2, Rвш3 (рис. 6-1) имеют сопротивления, соответствующие отрезкам de, cd и bc. По имеющимся значениям сопротивлений ступеней сопротивления секций находят так:

$$R_{вш1} = R_1 - R_2; R_{вш2} = R_2 - R_3; R_{вш3} = R_3 - R_{дв};$$

Аналитический метод. Отношение I1/I2 обозначим через λ. Для трехступенчатого пуска (рис. 1) с токами переключения I1 и I2 из условия равновесия электрической цепи следует, что:

$$\lambda = I1/I2 = M1/M2 = R1/R2 = R2/R3 = R3/R_{дв}$$

Сопротивление первой пусковой ступени, ограничивающее пусковой ток значением I1:

$$R1 = Uс/I1$$

Сопротивления пусковых ступеней:

$$R2 = \frac{R1}{\lambda}; R3 = \frac{R2}{\lambda} = \frac{R1}{\lambda^2}; R_{дв} = \frac{R3}{\lambda} = \frac{R1}{\lambda^3};$$

или

$$R1 = R2\lambda; R2 = R3\lambda; R3 = R_{дв}\lambda$$

Если известны токи I1 и I2, то число ступеней

$$m = \frac{\lg \frac{1}{R_{дв} I_{*2}}}{\lg \left(\frac{I_{*1}}{I_{*2}} \right)} \text{ или } m = \frac{\lg \frac{1}{R_{дв} M_{*1}}}{\lg \left(\frac{M_{*1}}{M_{*2}} \right)}$$

Если число т при подсчетах оказывается дробным, то необходимо изменить M1 или M2.

3.МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Самостоятельная работа выполняется с использованием пособий:

1. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода: Учеб. пособие для вузов, – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Издательство МЭИ, 2003,2007. - 224 с.
2. В.В. Москаленко. Электрический привод. Учеб. пособие. Доп. Мин. обр. РФ. М.: Мастерство: Высш. шк. 2000, 367 с.

Критерии оценки на зачётном занятии.

Оценка «удовлетворительно» ставится, если студент изучил основные положения теории электроприводов.

Оценка «хорошо» ставится, если студент изучил основные положения теории и показал хорошие знания по принципам работы, классификации электроприводов, по методам и способам формализации объектов, процессов, явлений и построения диаграмм и графиков функционирования электроприводов.

Оценка «отлично» ставится, если студент изучил основные положения теории и показал отличные знания по принципам функционирования различных типов электроприводов, классификации способов управления электромеханических систем, по методам и способам расчета координат на механических характеристиках; расчета времени разгона, торможения и выпору электродвигателей для различных типов приводов.

При изучении дисциплины студентам следует опираться на знание, а при необходимости повторение отдельных разделов следующих учебных дисциплин: Высшая математика, Физика.

Целесообразная последовательность самостоятельного изучения материала дисциплины определяется соответствующими рекомендациями преподавателя. Самостоятельная работа проводится с целью углубления знаний по дисциплине и предусматривает:

- чтение студентами рекомендованной литературы и усвоение теоретического материала дисциплины;
- подготовку к практическим занятиям;
- работу с Интернет-источниками;
- посещение отраслевых выставок и семинаров, проводимых в Благовещенске;
- подготовку к написанию контрольной работы, сдаче зачёта.

Планирование времени на самостоятельную работу, необходимого на изучение настоящей дисциплины, студентам лучше всего осуществлять на весь семестр, предусматривая при этом регулярное повторение пройденного материала. Материал, законспектированный на лекциях, необходимо регулярно дополнять сведениями из литературных источников, представленных в "Рабочей программе". По каждой из тем для самостоятельного изучения, приведенных в Рабочей программе дисциплины следует сначала прочитать рекомендованную литературу и при необходимости составить краткий конспект основных положений, терминов, сведений, требующих запоминания и являющихся основополагающими в этой теме и для освоения последующих разделов курса.

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 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 «Электрический привод»:

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

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 работы

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 кон-

трольные 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.

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

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 теоретических основ 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);

- выполнение контрольных работ;

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

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

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Онищенко Г.Б. Электрический привод: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Б. Онищенко. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. - 288 с.
2. 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.
3. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода: Учеб. пособие для вузов, – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Издательство МЭИ, 2003,2007. - 224 с.
4. В.В. Москаленко. Электрический привод. Учеб. пособие. Доп. Мин. обр. РФ. М.: Мастерство: Высш. шк. 2000, 367 с.
5. Сенигов П.Н., Карпеш М.А. Электрический привод. Руководство по выполнению базовых экспериментов. ЭП.002 РБЭ (905.1). – Челябинск: ООО «Учебная техника», 2005. –20 с.