

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
ФГБОУ ВПО КОСТРОМСКАЯ ГСХА

Кафедра электропривода и электротехнологии

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Лабораторный практикум
для студентов направлений подготовки
110800.62 «Агроинженерия»
и 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника»
очной и заочной форм обучения

КАРАБАЕВО
Костромская ГСХА
2013

УДК 621.34
ББК 31.291
Э 45

Составители: сотрудники кафедры электропривода и электротехнологии Костромской ГСХА к.э.н., доцент *А.А. Васильков*, к.т.н., старший преподаватель *И.В. Бушуев*.

Рецензент: к.т.н., доцент Костромской ГСХА *Д.М. Олин*.

*Рекомендовано к изданию
методической комиссией факультета
электрификации и автоматизации сельского хозяйства,
протокол № 6 от 9 октября 2013 года*

Э 45 **Электропривод** : лабораторный практикум для студентов направлений подготовки 110800.62 «Агроинженерия» и 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника» очной и заочной форм обучения / сост. А.А. Васильков, И.В. Бушуев. — Караваево : Костромская ГСХА, 2013. — 34 с.

В издании рассмотрены способы и средства экспериментального получения электромеханических и механических характеристик электродвигателей постоянного и переменного тока, приведены краткие теоретические сведения, даны подробные указания по выполнению лабораторных работ.

Лабораторный практикум по разделам «Электродвигатели постоянного тока» и «Асинхронные трехфазные электродвигатели» предназначен для студентов направлений подготовки 110800.62 «Агроинженерия», профиль «Электрооборудование и электротехнологии» и 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника» очной и заочной форм обучения.

УДК 621.34
ББК 31.291

© ФГБОУ ВПО Костромская ГСХА, 2013
© А.А. Васильков, И.В. Бушуев, составление, 2013
© РИО КГСХА, оформление, 2013

Оглавление

Введение.....	4
Лабораторная работа 1 Исследование механических и электромеханических (скоростных) характеристик двигателя постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения	5
Лабораторная работа 2 Исследование механической и электромеханической (скоростной) характеристик трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.....	16
Список рекомендуемых источников.....	31

Введение

Лабораторный практикум подготовлен в соответствии с Государственным образовательным стандартом и примерной программой дисциплины «Электропривод» для бакалавров по направлениям подготовки 110800.62 «Агроинженерия» (профиль «Электрооборудование и электротехнологии») и 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника» очной и заочной форм обучения.

Практикум предназначен для освоения теоретического и практического материала дисциплины студентами очной и заочной форм обучения. Он содержит необходимые данные по электрооборудованию, основные формулы для расчётов, принципиальные электрические схемы, формы таблиц для заполнения результатов измерений и вычислений, примеры оформления отчетов.

С целью закрепления теоретических знаний по электроприводу проводятся лабораторные испытания, результаты которых студент должен оформить в виде отчёта. Отчёт оформляется в соответствии с требованиями стандартов и норм ЕСКД на специально отведенных листах практикума и на отдельных листах, прикреплённых в конце соответствующей работы. Защита отчетов по каждой работе проводится индивидуально по мере их выполнения.

Для систематизации и проверки полученных знаний студенту следует самостоятельно проанализировать результаты лабораторных исследований и ответить на поставленные вопросы. С этой целью каждый раздел лабораторного практикума сопровождается контрольными вопросами.

Лабораторный практикум охватывает 1 и 2 разделы учебной программы по дисциплине «Электропривод». В конце лабораторного практикума приведен список литературы, рекомендуемой для изучения дисциплины.

Лабораторная работа 1

Исследование механических и электромеханических (скоростных) характеристик двигателя постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения

Цель работы: освоить методику расчетного и экспериментального получения механических и электромеханических (скоростных) характеристик электродвигателя с независимым (параллельным) возбуждением для различных режимов работы. Провести снятие механических и скоростных характеристик электродвигателя постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения (ДПТ НВ) при изменении его параметров и схем включения.

Программа работы

1. Ознакомиться с электрооборудованием лабораторного стенда. Изучить его устройство и принцип работы, записать паспортные данные исследуемого электродвигателя.

2. Выполнить соединение аппаратуры в соответствии со схемой соединения, приведенной на рисунке 1.1.

3. Включить в работу лабораторный стенд и получить экспериментальные данные для построения характеристик исследуемого двигателя в двигательном, рекуперативном (при $R_{\partial} = 0$ и $R_{\partial 1} \neq 0$) и режиме противовключения (при $R_{\partial 2} \neq 0$).

4. Отключить от сети лабораторный стенд и выполнить соединение аппаратуры в соответствии со схемой соединения, приведенной на рисунке 1.2.

5. Включить в работу лабораторный стенд и получить экспериментальные данные для построения характеристик исследуемого двигателя в динамическом тормозном режиме (при $R_{\partial 1} \neq 0$ и $R_{\partial 2} \neq 0$).

6. По данным, полученным в пунктах 3 и 5, вычислить и построить графики экспериментальных механических характеристик и отдельно скоростных характеристик электродвигателя в двигательном и тормозных режимах.

7. Вычислить значения угловой скорости по уравнениям скоростных и механических характеристик в двигательном и тормозных режимах и на графиках по пункту 6 построить расчетные скоростные и механические характеристики. Графики, полученные экспериментальными и расчетными методами, построить различными типами линий.

8. Составить отчет по работе.

9. Сопоставить результаты построения механических характеристик по экспериментальным и паспортным данным. Сделать выводы.

Основные теоретические сведения

При рассмотрении работы электродвигателя, приводящего в действие производственный механизм, необходимо, прежде всего, выявить соответствие механических характеристик двигателя характеристике производственного механизма. Поэтому для правильного проектирования и экономичной эксплуатации электропривода в различных режимах работы необходимо изучить механические и скоростные характеристики.

Уравнение скоростной характеристики:

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{r_{я} + R_{д}}{c\Phi} I, \quad (1.1)$$

где U — напряжение на зажимах якоря, В;

I — ток протекающий по обмотке якоря, А;

$r_{я}$ — сопротивление цепи якоря, Ом;

$R_{д}$ — добавочное сопротивление в цепи якоря, Ом;

c — конструктивная постоянная электродвигателя;

Φ — магнитный поток, Вб;

ω — угловая скорость, рад/с.

Уравнение механической характеристики:

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{r_{я} + R_{д}}{(c\Phi)^2} M, \quad (1.2)$$

где M — момент, развиваемый двигателем, Н·м.

С помощью уравнений (1.1) и (1.2) строятся аналитические механические и скоростные характеристики двигателя постоянного тока независимым возбуждением (ДПТ НВ) в двигательном и тормозном режимах. Входящие в эти выражения величины предварительно вычисляются и берутся из опытов. Для ДПТ НВ магнитный поток $c\Phi = \text{const}$, следовательно, механическая и скоростная характеристики имеют вид прямой линии. Поэтому для построения характеристик двигателя по паспортным данным достаточно определить две точки. Значение $c\Phi$ вычисляем по каталожным данным электродвигателя:

$$c\Phi = \frac{U_n - I_n r_{я}}{\omega_n}, \quad (1.3)$$

где $r_{я}$ — сопротивление якоря, определяемое из выражения

$$r_{я} = 0,5U_n \frac{(1 - \eta_n)}{I_n}, \quad (1.4)$$

где η_n — КПД двигателя при номинальной мощности.

Добавочное сопротивление R_{∂} измеряется прибором. Значение момента двигателя находится из выражения

$$M = c\Phi I_{я}, \quad (1.5)$$

Благодаря свойству обратимости, электродвигатели могут работать в двигательном, генераторном или тормозном режимах. Каждый тормозной режим является генераторным, так как энергия, поступающая в электродвигатель с вала, преобразуется в электрическую и либо отдается в сеть, либо затрачивается на нагрев элементов якорной цепи, обладающих активным сопротивлением, и рассеивается в окружающую среду.

Основные признаки двигательного режима:

- совпадение по направлению электромагнитного момента M и угловой скорости ω ;
- противоположные по направлению ЭДС E и ток I в обмотке якоря.

Для тормозных режимов характерны обратные соотношения этих величин:

- противоположные по направлению электромагнитного момента M и угловой скорости ω ;
- совпадение по направлению ЭДС E и ток I в обмотке якоря.

В лабораторном стенде для испытания исследуемого ДПТ НВ (MI) в различных режимах работы используется электромашина нагрузка для моделирования механической нагрузки.

Использование электродвигателя на *искусственных механических характеристиках* связано с необходимостью ограничения пускового тока и момента регулирования скорости рабочей машины, обеспечения работы двигателя в тормозных режимах.

Искусственные механические характеристики, получаемые при введении дополнительного сопротивления R_x в цепь якоря, проходят через точку идеального холостого хода ω_0 , принадлежащую естественной характеристике, но имеют меньшую по отношению к ней жесткость. Такие характеристики, как правило, используются для ограничения тока якоря в процессе пуска электродвигателя или в режиме торможения противовключением.

Тормозные режимы ДПТ НВ: генераторное торможение с отдачей электроэнергии в сеть (рекуперативный); торможение противовключением; динамическое торможение.

Генераторный тормозной режим имеет место, когда угловая скорость ω якоря становится больше скорости идеального холостого хода ω_0 , т.е. $\omega > \omega_0$. (рис. 1.1, участок характеристики ω_0, a). При этом

ЭДС якоря E становится больше напряжения сети и ток якоря I_a под воздействием ЭДС E меняет свое направление, становится отрицательным и электромагнитный момент, т.е. происходит торможение вращения вала двигателя.

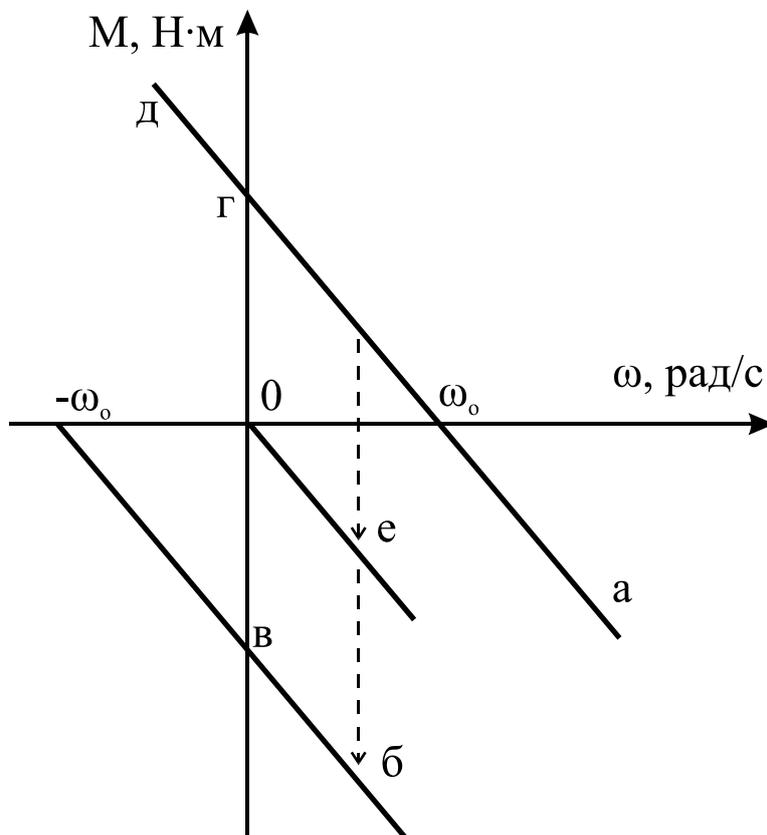


Рис. 1.1. Механические характеристики ДПТ НВ

Режим торможения противовключением возможен двумя способами: реверсом двигателя и тормозным спуском. Оба способа по физическим процессам, протекающим в двигателе, не отличаются друг от друга. При реверсировании меняют полярность напряжения якоря или обмотки возбуждения. Обладавший определенным моментом инерции, двигатель продолжает вращаться в прежнем направлении и ЭДС E сохраняет свое направление. При этом ЭДС E и напряжение U направлены в одну сторону, а ток под их действием изменяет знак на противоположный, что вызывает изменение направления момента, который в данном случае будет тормозным (рис. 1.1, участок характеристики $б, в$). Режим торможения будет продолжаться до момента остановки электродвигателя (рис. 1.1, точка характеристики $в$), после чего, если электродвигатель остается включенным, он переходит в двигательный режим обратного включения (рис. 1.1, участок характеристики $в, -\omega_0$).

При втором способе со стороны рабочей машины прикладывается сила, противоположная по направлению, которая притормаживает двигатель. По мере уменьшения оборотов двигателя уменьшается ЭДС E до 0 в момент остановки вращения двигателя, при этом напряжение U , приложенное к якорю, остается неизменным. Режим торможения начнется с момента остановки электродвигателя, после того, как обороты двигателя станут отрицательными (рис. 1.1, участок характеристики ε, δ). При этом ЭДС E и напряжение U становятся направлены в одну сторону, а ток под их действием изменяет знак на противоположный, что вызывает изменение направления момента, который в данном случае будет тормозным.

Режим *динамического торможения* имеет место при отключении обмотки якоря от сети и замыкании её на дополнительное сопротивление. Обмотка возбуждения при этом остается включенной в сеть. При этом в силу инерции якоря двигателя, скорость и ЭДС не изменяют направления (рис. 1.1, участок характеристики $\varepsilon, 0$). Ток в якоре под действием ЭДС изменяет свое направление на противоположное. При этом момент двигателя становится отрицательным, т.е. тормозным. Торможение продолжается до момента остановки двигателя, т.е. когда равен $\omega = 0$.

Для изучения механических и скоростных характеристик ознакомимся с электрооборудованием лабораторного стенда. В его состав входят нижеследующие компоненты (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Состав электрооборудования лабораторного стенда

Наименование	Условное обозначение в схеме
1. Электромашинная нагрузка с асинхронным двигателем и двигателем постоянного тока	$M1$ и $M2$
2. Преобразователь частоты	$UZ1$
3. Амперметр	$PA1$
4. Вольтметр	$PV1$
5. Реостат возбуждения машины постоянного тока $M1$	$R\delta$
6. Выпрямитель	$VD1$
7. Указатель частоты вращения	$BR1$
8. Блок трехфазного питания	$C1$
9. Блок постоянного тока	$C3$

Блок электромашинной нагрузки представляет спаренные между собой и установленные на едином основании ДПТ НВ ($M2$) и трехфазный асинхронный двигатель ($M1$).

Создавать различную нагрузку на испытуемом двигателе $M2$ будет асинхронный двигатель $M1$. За счет того, что асинхронный двигатель подключен к частотному преобразователю, частота его вращения может изменяться от -314 до 314 рад/с. В зависимости от направления вращения двигателя $M1$ и схемы включения на ДПТ НВ $M2$ создается двигательный или тормозной режим работы.

Порядок выполнения работы

1. Убедиться, что устройства, используемые в экспериментах, отключены от сети электропитания.
2. Соединить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений, приведенной на рисунке 1.2.

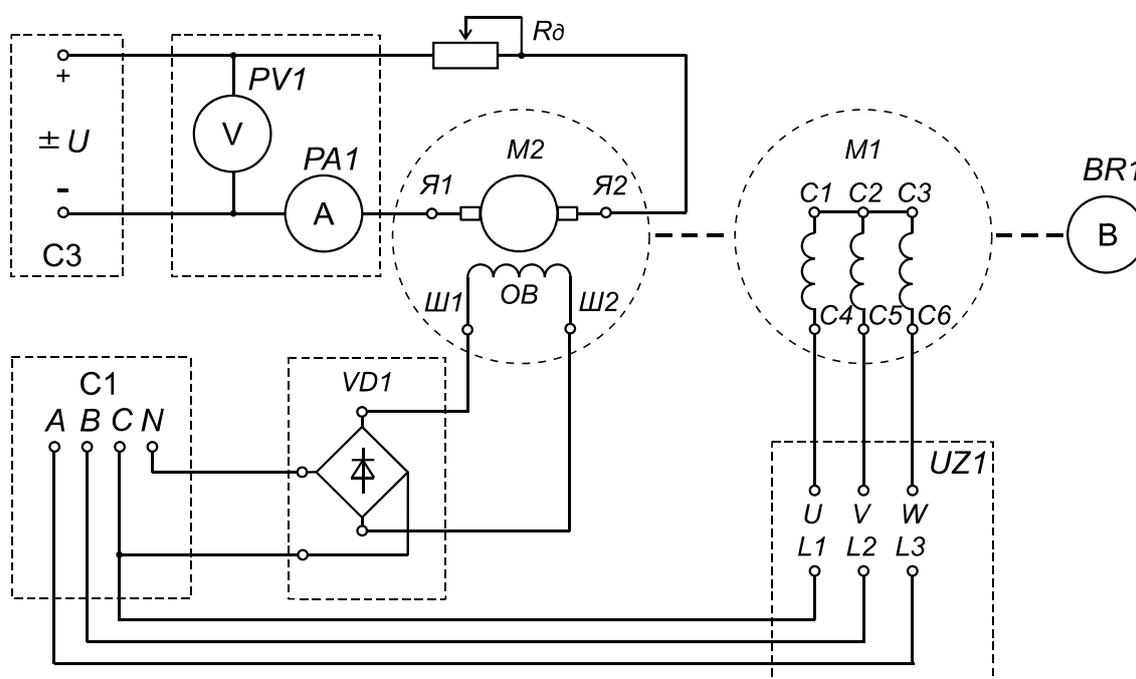


Рис. 1.2. Электрическая схема для снятия характеристик ДПТ НВ в двигательном и тормозных режимах (рекуперативном и противовключения)

3. Регулировочной рукояткой реостата Rd установить максимальную величину активного сопротивления в цепи якоря.
4. Включить устройство защитного отключения и автоматические выключатели источника питания $C1$.
5. Включить питание тахометра $BR1$.
6. Вращая регулировочную рукоятку потенциометра преобразователя частоты $UZ1$, установить задание скорости вращения магнитного поля двигателя $M1$, равную 0 рад/с.

7. Нажать кнопку «RUN» блока *UZ1* и, плавно вращая регулировочную рукоятку потенциометра, установить скорость вращения ротора двигателя *M1* 84 рад/с (соответствует 800 об/мин).

8. Включить автоматический выключатель (блок *C3*) и подать на двигатель *M2* в цепь якоря 110 В. Плавно регулировочной рукояткой реостата *Rd* установить минимальное значение сопротивления.

ВНИМАНИЕ! Если при уменьшении сопротивления величина тока *A1* растет, то необходимо выключить питание блока *C3* и поменять полярность обмотки якоря (*Я1* с *Я2*).

9. Для снятия характеристик электропривода с двигателем постоянного тока *M2* в двигательном режиме установить задание скорости вращения ротора двигателя *M1* менее 84 рад/с вращением регулировочной рукоятки потенциометра преобразователя частоты *UZ1*, а для перевода в генераторный (рекуперативный) тормозной режим — более 84 рад/с.

10. С помощью амперметра *A1* и тахометра *BR1* измерить параметры электропривода.

11. После снятия характеристик по заданию преподавателя ввести заданное сопротивление в цепи якоря *Rd* и повторить опыт в двигательном и рекуперативном режимах.

12. Для снятия характеристик двигателя *M2* в тормозном режиме противовключения необходимо остановить стенд в следующем порядке:

- остановить двигатель *M1*, нажав «STOP» на панели управления преобразователя частоты *UZ1*;
- снять напряжение с якоря двигателя *M2* автоматическим выключателем блока *C3*;
- выключить автоматический выключатель на блоке *C1*.

13. Поменять местами два фазных провода на выходе преобразователя частоты *UZ1* (например, *U* и *V*). После данного изменения схемы двигатель *M1* будет вращать исследуемый двигатель *M2* в обратном направлении.

14. Включить устройство защитного отключения и автоматические выключатели источника питания *C1*.

15. Включить автоматический выключатель (блок *C3*) и подать на двигатель *M2* в цепь якоря около 110 В.

16. Для снятия характеристик двигателя *M2* в тормозном режиме противовключения запустить двигатель *M1* и вращением регулировочной рукоятки потенциометра преобразователя частоты *UZ1* снять две-три точки в отрицательном диапазоне скоростей.

ВНИМАНИЕ! При снятии показаний следим за величиной тока на приборе $PA1$, чтобы он был не выше допустимой величины для двигателя $M2$ (5 А).

17. Для снятия характеристик двигателя $M2$ в динамическом тормозном режиме необходимо выключить стенд в соответствии с п. 12 и соединить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений, приведенной на рисунке 1.3.

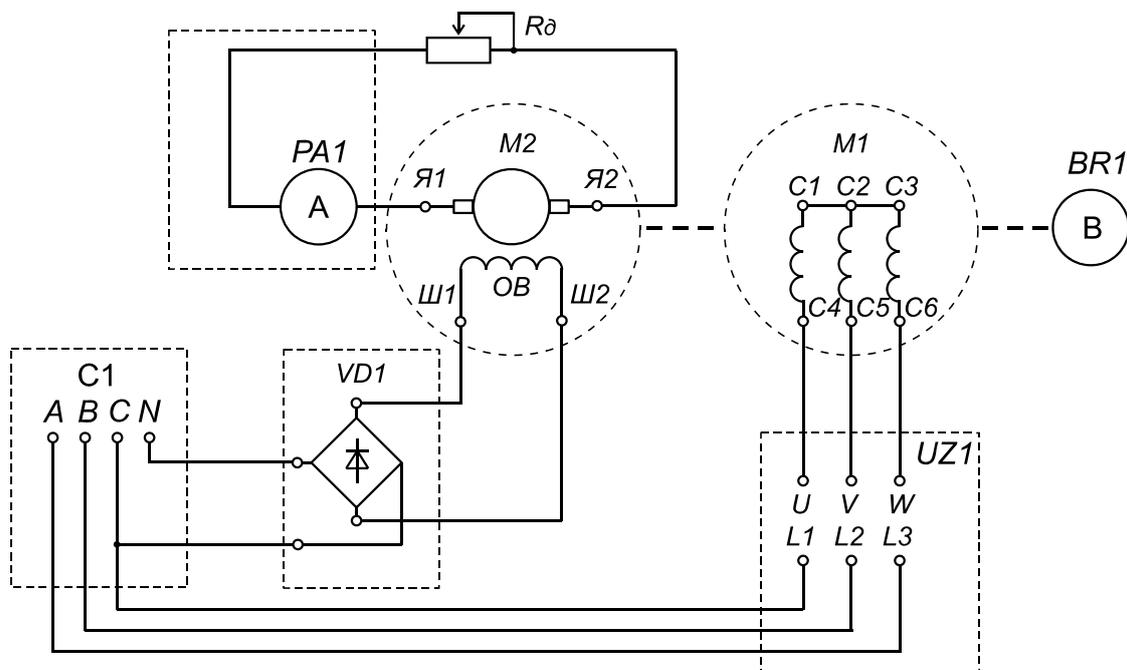


Рис. 1.3. Электрическая схема для снятия характеристик ДПТ НВ в динамическом тормозном режиме

18. Поменять местами два фазных провода на выходе преобразователя частоты $UZ1$ (например, U и V).

19. Включить устройство защитного отключения и автоматические выключатели источника питания $C1$.

20. Для снятия характеристик двигателя $M2$ в динамическом тормозном режиме запустить двигатель $M1$ и вращением регулировочной рукоятки потенциометра преобразователя частоты $UZ1$ снять две-три точки в положительном диапазоне скоростей.

21. По завершении эксперимента выключить лабораторный стенд в соответствии с порядком в п. 12.

22. Значение магнитного потока $c\Phi$ и сопротивление якоря $r_{я}$ определить по формулам (1.3) и (1.4) и паспортным данным двигателя $M2$.

23. По формуле (1.2) определить расчетную угловую скорость $\omega_{расч}$, а по формуле (1.5) электромагнитный момент M двигателя постоянного тока $M2$.

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

1. Паспортные данные исследуемого двигателя (табл. 1.2).

Таблица 1.2. Паспортные данные исследуемого двигателя

Наименование параметров	Значение
Машина постоянного тока	M2
Номинальная полезная мощность $P_{н2}$, кВт	
Номинальное напряжение якоря $U_{ия2}$, В	
Номинальный ток якоря $I_{ия2}$, А	
Номинальное напряжение обмотки возбуждения $U_{нв2}$, В	
Номинальный ток обмотки возбуждения $I_{нв2}$, А	
Номинальная частота вращения $n_{н2}$, об/мин	
КПД $\eta_{н2}$, %	

2. Основные расчетные формулы и примеры расчетов механических и скоростных характеристик в каждом режиме

$$r_{я} = 0,5U_{н} \frac{(1 - \eta_{н})}{I_{н}} \qquad r_{я} = \dots\dots\dots$$

$$\omega_{н} = \frac{\pi n_{н}}{30} \qquad \omega_{н} = \dots\dots\dots$$

$$c\Phi = \frac{U_{н} - I_{н}r_{я}}{\omega_{н}} \qquad c\Phi = \dots\dots\dots$$

Двигательный режим:

1) $R_{\delta} = 0$

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{r_{я} + R_{\delta}}{c\Phi} I \qquad \omega = \dots\dots\dots$$

$$M = c\Phi I_{я} \qquad M = \dots\dots\dots$$

2) $R_{\delta} \neq 0$

$$R_{\delta I} = \dots\dots\dots$$

$$\omega = \dots\dots\dots$$

$$M = \dots\dots\dots$$

Рекуперативный режим:

3) $R_{\delta} = 0$

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{r_{я} + R_{\delta}}{c\Phi} I \qquad \omega = \dots\dots\dots$$

$$M = c\Phi I_{я} \qquad M = \dots\dots\dots$$

4) $R_{\delta} \neq 0$

$$R_{\delta I} = \dots\dots\dots$$

$$\omega = \dots\dots\dots$$

$$M = \dots\dots\dots$$

Режим противовключения:	
5) $R_{\partial} \neq 0$	$R_{\partial 1} = \dots\dots\dots$
$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{r_{я} + R_{\partial}}{c\Phi} I$	$\omega = \dots\dots\dots$
$M = c\Phi I_{я}$	$M = \dots\dots\dots$
Динамический тормозной режим:	
6) $R_{\partial} \neq 0$	$R_{\partial 1} = \dots\dots\dots$
$\omega = -\frac{r_{я} + R_{\partial}}{c\Phi} I$	$\omega = \dots\dots\dots$
$M = c\Phi I_{я}$	$M = \dots\dots\dots$
7) $R_{\partial} \neq 0$	$R_{\partial 2} = \dots\dots\dots$
	$\omega = \dots\dots\dots$
	$M = \dots\dots\dots$

3. Данные измерений и вычислений по результатам опытов (табл. 1.3).

Таблица 1.3. Опытные и расчетные данные ДПТ НВ

Напряжение на зажимах якоря, В		$U = \underline{\hspace{2cm}}$				
Режим работы	Условия опыта	Экспериментальные и расчетные данные				
		$I_{я},$ А	$n,$ об/мин	$\omega_{оп},$ рад/с	$\omega_{расч},$ рад/с	$M,$ Н·м
1. Двигательный	$R_{\partial} = 0$					
2. Двигательный	$R_{\partial 1} = \underline{\hspace{1cm}}$					
3. Рекуперативный	$R_{\partial 1} = \underline{\hspace{1cm}}$					
4. Рекуперативный	$R_{\partial} = 0$					
5. Противовключения	$R_{\partial 2} = \underline{\hspace{1cm}}$					
6. Динамический	$R_{\partial 1} = \underline{\hspace{1cm}}$					
7. Динамический	$R_{\partial 2} = \underline{\hspace{1cm}}$					

4. Графики отдельно механических и скоростных характеристик; на каждом из графиков приводятся характеристики всех режимов двигателя, полученные опытным и расчетным методами. Опытные и расчетные характеристики должны отличаться между собою расцветкой или типом линий. Выполнение графической части должно соответствовать требованиям ЕСКД.

5. Заключение о проделанной работе

Контрольные вопросы

1. В чем отличие естественной и искусственной механической характеристики ДПТ НВ?
2. Дайте определение механической и электромеханической характеристик электродвигателя.
3. Какие режимы работы существуют у ДПТ НВ ?
4. Что такое скорость идеального холостого хода?
5. От каких параметров зависит скорость идеального холостого хода?
6. Как изменяется механическая характеристика ДПТ НВ при введении добавочного сопротивления в цепь якоря?
7. Как перевести двигатель в режим генераторного (рекуперативного) торможения?
8. Как перевести двигатель в режим торможения противовключения?
9. Как перевести двигатель в режим динамического торможения с независимым возбуждением?

Лабораторная работа 2
Исследование механической и электромеханической
(скоростной) характеристик
трехфазного асинхронного электродвигателя
с короткозамкнутым ротором

Цель работы: освоить методику расчетного и экспериментального получения механических и электромеханических (скоростных) характеристик трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором (АД) для различных режимов работы. Подтвердить теоретические зависимости механических и скоростных характеристик путем сравнения экспериментальных данных с расчетными.

Программа работы

1. Ознакомиться с электрооборудованием лабораторного стенда. Изучить его устройство и принцип работы, записать паспортные данные исследуемого электродвигателя.

2. Выполнить соединение аппаратуры в соответствии с электрической схемой соединения, приведенной на рисунке 2.1.

3. Получить экспериментальные данные для построения характеристик исследуемого двигателя в двигательном режиме в диапазоне скорости от $+0,2 \cdot \omega_0$ до $+0,8 \cdot \omega_0$. Привести полученные данные к номинальному напряжению АД.

4. Отключить от сети лабораторный стенд и выполнить соединение аппаратуры в соответствии со схемой соединения, приведенной на рисунке 2.2.

5. Включить в работу лабораторный стенд и получить экспериментальные данные для построения характеристик исследуемого двигателя в режимах торможения рекуперативном и противовключением в диапазоне скорости от $+1,2 \cdot \omega_0$ до $-0,5 \cdot \omega_0$. Привести полученные данные к номинальному напряжению АД.

6. Получить экспериментальные данные для построения зависимости постоянных потерь в диапазоне скорости от $-0 \cdot \omega_0$ до $+1,2 \cdot \omega_0$, при отключенном двигателе $M1$.

7. Отключить от сети лабораторный стенд и выполнить соединение аппаратуры в соответствии со схемой соединения на рисунке 2.3.

8. Включить в работу лабораторный стенд и получить экспериментальные данные для построения характеристик исследуемого двигателя в динамическом тормозном режиме в диапазоне скорости от -0 до $+\omega_0$. Привести полученные данные к номинальному току АД.

9. Рассчитать по паспортным и каталожным данным механические характеристики двигателя в режимах торможения противовключением и двигательном при изменении скорости в диапазоне от $-0,5 \cdot \omega_0$ до $+\omega_0$.

10. По данным, полученным в пунктах 5, 6 и 8, построить графики экспериментальных механических характеристик и отдельно скоростных характеристик электродвигателя в двигательном и тормозных режимах.

11. Составить отчет по работе.

Основные теоретические сведения

Асинхронные электродвигатели (АД) по количеству и суммарной установленной мощности занимают первое место среди других типов двигателей в промышленности и сельском хозяйстве. Они получили наибольшее распространение, так как имеют простую конструкцию, малую стоимость, удобны и надежны в эксплуатации. Более 98% электродвигателей, используемых в сельском хозяйстве, — АД с короткозамкнутым ротором.

Принцип работы АД следующий. На три обмотки статора, сдвинутые в пространстве на 120° , подается синусоидальное трехфазное напряжение переменного тока, сдвинутое во времени также на 120° . В результате в обмотке статора возникает вращающееся магнитное поле. Угловая скорость вращающегося магнитного поля называется синхронной скоростью АД, она обозначается ω_0 . Это поле пересекает ротор АД, находящийся внутри статора, наводит в нем ЭДС. Взаимодействие токов в обмотке ротора с полем статора создают на роторе электромагнитные силы, в направлении вращающегося поля статора. Совокупность сил создает на роторе электромагнитный момент, приводящий его во вращение со скоростью ω . Наведение ЭДС в обмотке ротора АД и появление вращающего момента двигателя возможны только при наличии разности между угловыми скоростями вращающегося магнитного поля статора и ротора, т.е. их несинхронного вращения. Поэтому такие электродвигатели называют асинхронными. Меру несинхронности для АД принято оценивать в относительных единицах, и она называется скольжением:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0},$$

где ω_0 — синхронная угловая скоростью магнитного поля статора, рад/с;

ω — угловая скорость ротора, рад/с.

Механическая характеристика асинхронного двигателя представляет собой сложную зависимость момента от скорости. Построение естественной характеристики АД может быть произведено по паспортным данным с использованием полной или упрощенной формул Клосса. Уравнение механической характеристики имеет вид:

$$M = \frac{2M_k(1 + \alpha s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\alpha s_k}, \quad (2.1)$$

где M_k — максимальный момент двигателя;
 s_k — критическое скольжение;
 α — отношение сопротивлений:

$$\alpha = \frac{r_1}{r_2} \approx 1.$$

Величины, используемые в нижеследующих уравнениях, определяются по паспортным и каталожным данным:

$$M_k = \mu_k M_n,$$

где μ_k — кратность максимального момента;
 M_n — номинальный момент двигателя, определяется из выражения:

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

В свою очередь ω_n — номинальная угловая скорость:

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30},$$

где n_n — номинальная частота вращения вала двигателя

Критическое скольжение определяют по формуле

$$s_k = \frac{s_n \left[\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 + 2s_n(\mu_k - 1)} - 1 \right]}{1 - 2s_n(\mu_k - 1)},$$

где s_n — номинальное скольжение:

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

где ω_0 — синхронная частота вращения ротора.

Угловая скорость вращающегося магнитного поля определяется из выражения:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p},$$

где f_1 — частота тока сети;
 p — число пар полюсов статора.

Следует отметить, что механические характеристики, полученные на основании как упрощенной, так и полной формулы Клосса, являются приближенными, так как не описывают всех процессов, происходящих в АД, и дают наиболее точное совпадение с реальной характеристикой лишь в области малых величин скольжения.

Генераторный тормозной режим (рекуперативный) получается, когда скорость ротора АД становится больше синхронной (рис. 2.1, участок характеристики ω_0, a).

В этом режиме АД потребляет реактивную энергию из сети, а механическую энергию, подводимую к валу, преобразует в активную электрическую энергию и отдает в сеть. Этот режим не находит применения для торможения рабочей машины, так как тормозной момент возможен только на большой скорости, но может быть применен при использовании АД в качестве нагрузочного устройств, например, при горячей обкатке двигателей внутреннего сгорания.

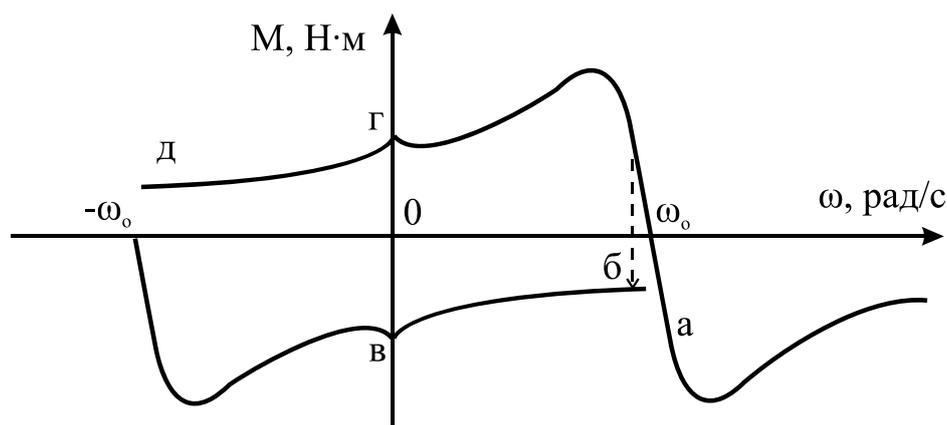


Рис. 2.1. Механические характеристики АД

Режим торможения противовключением у АД может быть реализован двумя способами: реверсом двигателя и тормозным спуском.

При реверсе двигателя путем изменения чередования фаз обмоток статора происходит изменение направления вращающегося магнитного поля статора и направление момента АД (рис. 2.1, участок характеристики $b, в$). Возникающий тормозной момент электродвигателя способствует быстрой остановке рабочей машины и, если электродвигатель не будет отключен от сети, начнет раскручивать ее в обратном направлении. Применение этого режима торможения связано со значительной токовой перегрузкой двигателя, так как ток обмотки статора в этом случае превышает значение пускового тока. Данный способ широко используется для сокращения выбега рабочей машины в целях экономии времени или повышения безопасности при аварийной остановке.

При втором способе тормозной режим противовключением возможен на рабочей ветви механической характеристики двигателя с фазным ротором. Для этого со стороны рабочей машины прикладывается сила, противоположная направлению включения АД, которая притормаживает двигатель, а затем заставляет вращаться ротор в обратную сторону (рис. 2.1, участок характеристики z, d). Тормозной режим начнется с момента остановки электродвигателя, после того, как обороты двигателя станут отрицательными.

Динамический тормозной режим АД может быть осуществлен при отключении обмотки статора работающего электродвигателя от сети переменного тока и подключении к источнику постоянного тока (независимым возбуждением) или трехфазной конденсаторной батарее (самовозбуждением).

Механическая характеристика АД в режиме динамического торможения с независимым возбуждением имеет характерный максимум кривой момента в области малых угловых скоростей. Постоянный ток, протекая по обмоткам статора, создает неподвижный в пространстве магнитный поток. За счет вращения в проводниках ротора индуцируется ЭДС под действием которой возникает ток ротора. Взаимодействие неподвижного магнитного потока статора и тока ротора приводит к появлению тормозного момента. Величина максимального тормозного момента в этом режиме может быть изменена за счет величины постоянного тока, протекающего по обмотке статора (рис. 2.2, участок характеристики e, θ).

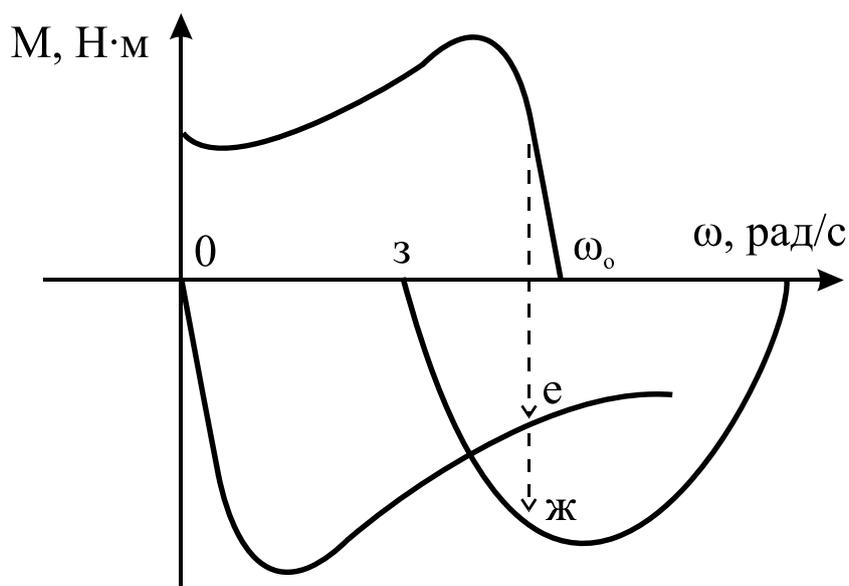


Рис. 2.2. Механические характеристики АД

Режим динамического торможения АД широко используется для сокращения времени выбега или повышения точности остановки в заданном положении рабочей машины.

При динамическом торможении с самовозбуждением АД работает в режиме асинхронного генератора с самовозбуждением. Первоначальный ток самовозбуждения возникает под действием ЭДС, индуцируемый в обмотках статора остаточным магнитным потоком ротора. В обмотках статора, замкнутых на конденсаторы, эта ЭДС обеспечивает протекание опережающего тока, который создает дополнительный магнитный поток.

Поток статора суммируется с остаточным, увеличивает результирующий магнитный поток, что ведет к еще большему увеличению ЭДС, возрастанию тока и, следовательно, тормозного момента.

Конденсаторное торможение АД возможно только при $\omega_k \geq (0,3 \dots 0,5)\omega_0$ (рис. 2.2, участок характеристики *жс, з*). Если значение скорости меньше, тормозной момент исчезает. Минимальная скорость, при которой возможно торможение, называется критической ω_k . Преимущество конденсаторного торможения перед другими способами заключается в том, что его можно применять без источника питания. Поэтому таким торможением пользуются как аварийным.

Для изучения механических и скоростных характеристик АД в различных режимах работы ознакомимся с электрооборудованием лабораторного стенда. В его состав входят следующие компоненты (табл. 2.1).

Таблица 2.1. Состав электрооборудования лабораторного стенда

Наименование	Условное обозначение в схеме
1. Электромашинная нагрузка с асинхронным двигателем и двигателем постоянного тока	<i>M1</i> и <i>M2</i>
2. Амперметр	<i>PA1, PA2</i>
3. Вольтметр	<i>PV1</i>
4. Реостат	<i>Rd</i>
5. Выпрямитель	<i>VD1, VD2</i>
6. Указатель частоты вращения	<i>BR1</i>
7. Регулируемый автотрансформатор	<i>TV1</i>
8. Блок трехфазного источника питания	<i>C1</i>
9. Блок трехфазного регулируемого источника питания	<i>C2</i>
10. Блок постоянного источника тока	<i>C3</i>

Блок электромашиной нагрузки представляет спаренные между собой и установленные на едином основании двигатель постоянного тока с независимым возбуждением $M2$ и трехфазный асинхронный двигатель $M1$.

Создавать различную нагрузку на испытуемом асинхронный двигателе $M1$ будет двигатель постоянного тока с независимым возбуждением $M2$. В зависимости от направления вращения двигателя $M2$ и схемы включения на испытуемом АД $M1$ создается двигательный или тормозной режим работы.

Во избежание перегрева обмоток двигателя большими токами испытания проводятся при пониженном напряжении, подводимом к зажимам статора с таким расчетом, чтобы токи при пониженных скоростях не превышали номинальных.

Поскольку испытания по снятию механических и скоростных характеристик АД проводятся при пониженном напряжении, моменты и токи, полученные из опытов, необходимо привести к номинальному напряжению (в зависимости от схемы соединения обмоток двигателя). Приведенные величины находятся из выражений:

– для моментов:

$$M_{U_n} = M_{U_{on}} \left(\frac{U_n}{U_{on}} \right)^2, \quad (2.2)$$

где $M_{U_{on}}$ — момент двигателя, полученный из опытов при пониженном напряжении;

U_n — номинальное напряжение при данной схеме соединения обмоток двигателя;

U_{on} — напряжение на обмотке двигателя при опыте;

– для токов:

$$I_{U_n} = I_{U_{on}} \frac{U_n}{U_{on}}, \quad (2.3)$$

где $I_{U_{on}}$ — ток двигателя, полученный из опытов при пониженном напряжении.

Для получения зависимости $M = f(\omega)$ необходимо скорость измерять с помощью тахометра, а момент асинхронного двигателя измерять с помощью нагрузочной машины $M2$. Следует учитывать при этом, что момент на валу испытуемого двигателя отличается от момента на валу машины $M2$ на величину механических потерь этих машин. Для учета момента потерь необходимо экспериментально исследовать зависимость $I_{mn} = f(\omega)$. Момент на валу испытуемого двигателя определится как

$$M = c\Phi(I_{я} \pm 0,5I_{mn}), \quad (2.4)$$

где I_{mn} — ток постоянных потерь якоря машины $M2$ при работе двигателя вхолостую.

Этот ток берется со знаком «+» при двигательном режиме двигателя $M1$ и «-» при тормозных режимах.

Значение магнитного потока $c\Phi$ определяется по паспортным данным машины $M2$ как

$$c\Phi = \frac{U_n - I_n r_{я}}{\omega_n},$$

где $r_{я}$ — сопротивление обмотки якоря, определяемое из выражения

$$r_{я} = 0,5U_n \frac{(1 - \eta_n)}{I_n},$$

где η_n — номинальный к.п.д. машины $M2$.

Порядок выполнения работы

1. Убедиться, что устройства, используемые в экспериментах, отключены от сети электропитания.

2. Соединить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений, приведенной на рисунке 2.3.

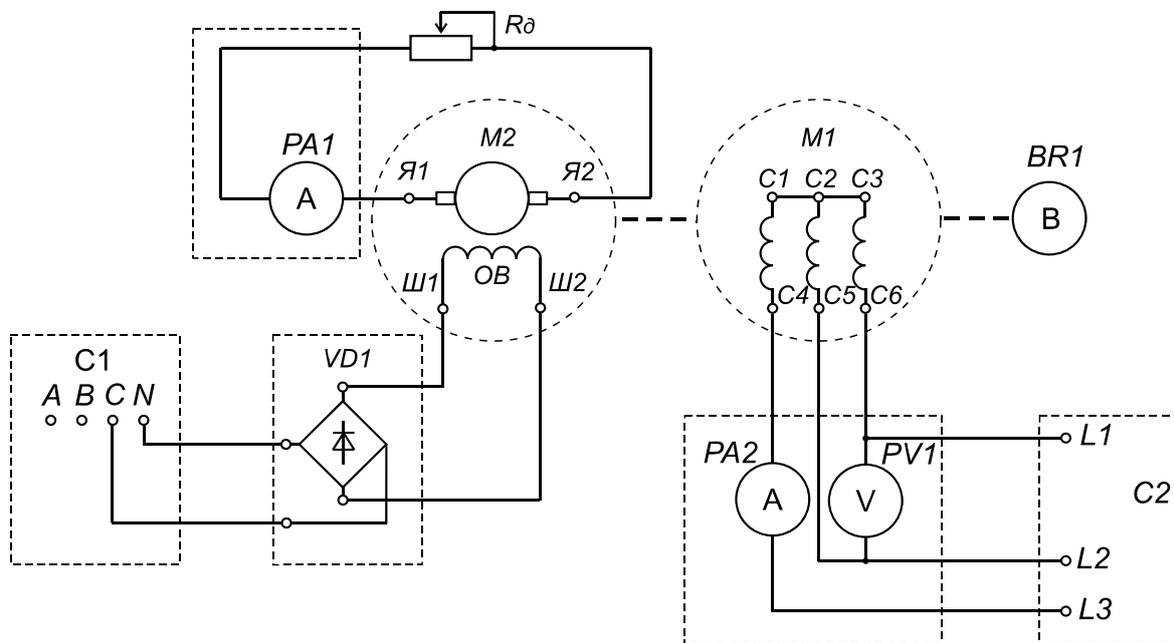


Рис. 2.3. Электрическая схема для снятия характеристик АД в двигательном режиме

3. Регулировочной рукояткой реостата $R1$ установить величину активного сопротивления по заданию преподавателя.

4. Включить питание на тахометре *BR1*.
5. Включить последовательно устройство защитного отключения и автоматические выключатели источника питания *C1* и *C2*.
6. Для снятия характеристик электропривода с АД *M1* в двигательном режиме (0 рад/с до ω_0), увеличивая величину активного сопротивления регулировочной рукояткой реостата *R1*, снять 6-8 точек показаний приборов (*A1*, *A2*, *V2* и *PT1*) и занести в таблицу 2.3.
7. Для снятия характеристик двигателя *M1* в тормозном режиме противовключения и рекуперативном необходимо выключить стенд в следующем порядке:
 - отключить напряжение с двигателя *M1* автоматическим выключатель блок *C2*;
 - отключить напряжение с обмотки возбуждения двигателя *M2* автоматическим выключатель блок *C1*.
8. Соединить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений, приведенной на рисунке 2.4.

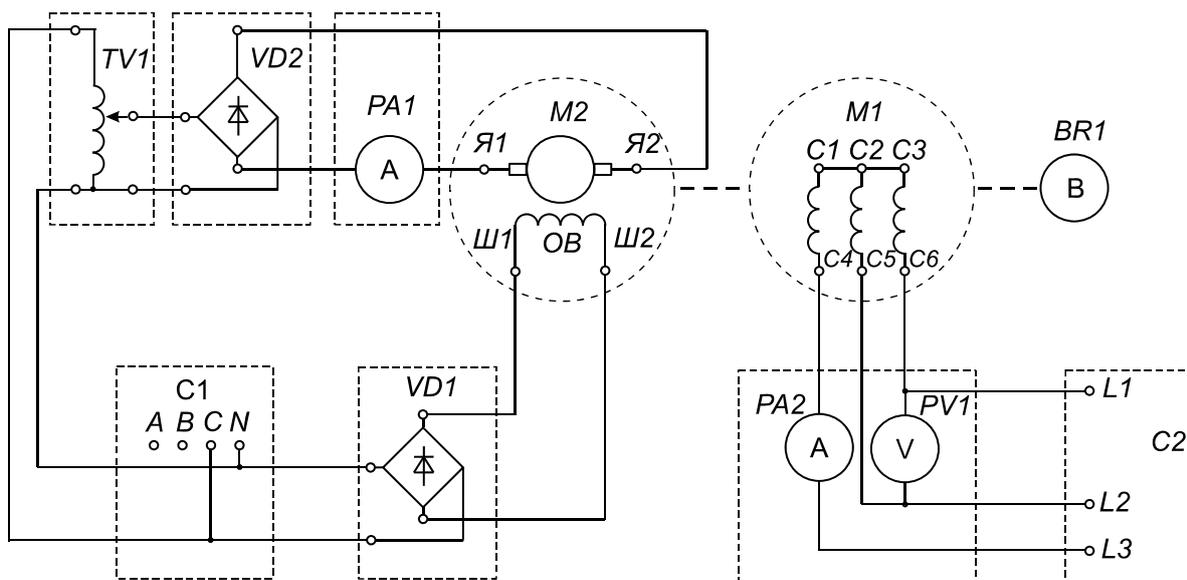


Рис. 2.4. Электрическая схема для снятия характеристик АД в тормозных режимах (рекуперативный и противовключения)

9. Для снятия характеристик двигателя *M1* в рекуперативном тормозном режиме необходимо, чтобы оба двигателя работали в одном направлении:
 - кратковременно включить автоматический выключатель блок *C2* и необходимо запомнить направление вращения двигателя *M1*;
 - включить автоматическим выключатель блок *C1* и, плавно поворачивая по часовой стрелке рукоятку автотрансформатора,

сравнить направление вращения двигателя $M2$. Если вращение не совпадает с двигателем $M1$, необходимо выключить двигатель и сменить полярность на якоре или обмотке возбуждения двигателя $M2$.

ВНИМАНИЕ! Перед включением необходимо убедиться, что ручка регулируемого автотрансформатора установлена в крайнее левое положение (напряжение на выходе автотрансформатора равно 0).

10. Включить последовательно устройство защитного отключения и автоматические выключатели источника питания $C1$ и $C2$.

11. Плавно поворачивая по часовой стрелке ручку автотрансформатора, разгоняем двигатели до синхронной скорости АД ω_0 . Продолжая плавно поворачивать рукоятку автотрансформатора по часовой стрелке, снять 2, 3 точки показаний приборов и занести в таблицу 2.3.

ВНИМАНИЕ! При снятии показаний величиной тока $PA1$ должна быть не более 5 А.

12. Для определения тока потерь I_{nn} необходимо отключить автоматический выключатель на блоке $C2$, и повторить опыт в диапазоне $0 \cdot \omega_0$ до $+1,2 \cdot \omega_0$ (снятия характеристик при отрицательных скоростях не обязательна, т.к. при одних и тех же скоростях величина тока потерь I_{nn} будет такая же по модулю).

13. Для снятия характеристик двигателя $M1$ в тормозном режиме противовключения необходимо:

- включить автоматический выключатель блока $C1$;
- поменять направление вращения двигателя $M2$, сменив полярность на якоре или обмотке возбуждения;
- рукоятку регулируемого автотрансформатора установить в крайнее левое положение.

14. Включить последовательно автоматические выключатели блока $C1$, затем блока $C2$.

15. Для снятия характеристик электродвигателя $M1$ в тормозном режиме противовключения (0 рад/с до $-0,5 \omega_0$), плавно поворачивая по часовой стрелке рукоятку автотрансформатора, снять 3, 4 точки показаний приборов ($PA1$, $PA2$, $PV2$ и $BR1$) и данные занести в таблицу 2.3.

16. Значение приведенного тока I_{np} (столбец 6 в таблице 2.3) определяется по формуле (2.3).

17. Определить опытный момент электродвигателя M_{on} (столбец 9 в таблице 2.1) по формуле (2.3).

18. Снятую при пониженном напряжении механическую характеристику двигателя $M_{on} = \mathcal{A}(\omega)$ привести к номинальному напряжению $M_{np} = f(\omega)$ (столбец 10 в таблице 2.4) по формуле (2.2).

19. Для снятия показаний динамического тормозного режима необходимо отключить от питания лабораторный стенд:

- отключить АД $M1$ автоматическим выключателем блока $C2$;
- отключить электродвигатель постоянного тока $M2$ автоматическим выключателем блока $C1$.

20. Соединить аппаратуру в соответствии со схемой электрических соединений, приведенной на рисунке 2.5.

21. Включить автоматический выключатель блока $C3$, и выставить реостатом R_d величину тока в обмотке АД $M1$ по заданию преподавателя.

22. Для снятия характеристики АД $M1$ в динамическом тормозном режиме задать режим скоростей на приводе от 0 до ω_0 (рад/с), вращением регулировочной рукоятки автотрансформатора.

23. Вначале, по мере увеличения момента, скорость будет нарастать медленно и ее измерение возможно лишь путем визуального отсчета числа оборотов и фиксирования времени. Этот процесс длится до достижения критического момента, после чего скорость двигателя быстро увеличивается.

В диапазоне скорости от нуля до критической необходимо снять показания приборов для 2, 3 точек. Затем увеличить скорость до синхронной и, постепенно снижая ее до критической, снять показания для 3, 4 точек. Данные измерений записать в таблицу 2.3.

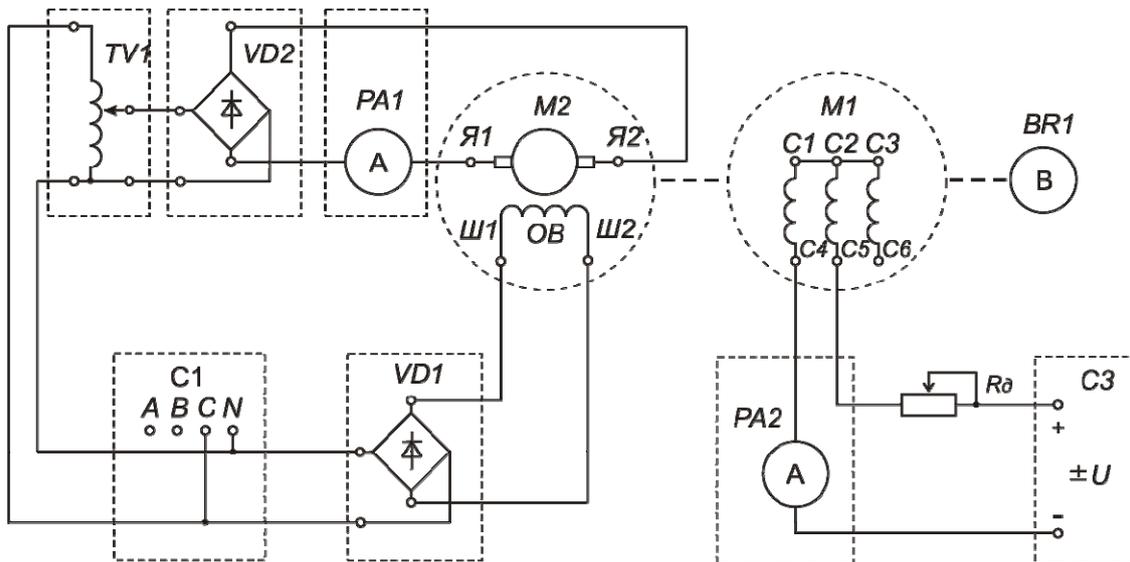


Рис. 2.5. Электрическая схема для снятия характеристик АД в динамическом тормозном режиме

24. Значения моментов в динамическом тормозном режиме M_{on} (столбец 9 в табл. 2.3) вычислить по формуле (2.4).

25. Полученные значения моментов M_{on} необходимо привести к эквивалентному номинальному току статора по нижеприведенной формуле:

$$M_{np} = M_{on} \left(\frac{kI_{on}}{I_n} \right)^2,$$

где k — коэффициент эквивалентного тока, зависящий от схемы соединения обмоток статора при динамическом торможении ($k = 1$).

26. По завершению эксперимента отключить лабораторный стенд, выключив последовательно автоматические выключатели блока $C1$, затем блока $C3$.

27. Точки аналитической механической характеристики вычислить по формуле (2.1). В связи с введением в формулу Клосса (2.1) корректировки, она пригодна к использованию только при положительных значениях момента АД. Результаты расчетов занести в таблицу 2.4.

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

1. Паспортные данные исследуемого двигателя в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Паспортные данные исследуемого двигателя

Наименование параметров	Значения
Асинхронный двигатель	$M1$
Номинальная полезная мощность $P_{н2}$, кВт	
Схема соединения обмоток	Δ / Y
Номинальное напряжение $U_{н2}$, В	/
Номинальный ток статора $I_{н2}$, А	/
Кратность пускового тока, $i_n = I_n / I_n$	
Кратность пускового момента μ_n	
Кратность минимального момента μ_{min}	
Кратность максимального момента μ_k	
Коэффициент мощности $\cos \varphi_n$	
Номинальные обороты вращения $n_{н2}$, об/мин	
Номинальное скольжение $s_{н2}$, %	
КПД $\eta_{н2}$, %	

2. Основные расчетные формулы и примеры расчетов механических и скоростных характеристик асинхронного двигателя

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$$

$$\omega_0 = \dots\dots\dots$$

$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30}$	$\omega_i = \dots\dots\dots$
$s_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0}$	$s_i = \dots\dots\dots$
$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}$	$M_i = \dots\dots\dots$
$M_k = \mu_k M_n$	$M_k = \dots\dots\dots$
$s_k = \frac{s_n \left[\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 + 2s_n(\mu_k - 1)} - 1 \right]}{1 - 2s_n(\mu_k - 1)}$	$s_k = \dots\dots\dots$

Основные расчетные формулы и примеры расчетов для нагрузочной машины и «прибора» двигателя постоянного тока MI

$r_{я} = 0,5U_n \frac{(1 - \eta_n)}{I_n}$	$r_{я} = \dots\dots\dots$
$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30}$	$\omega_n = \dots\dots\dots$
$c\Phi = \frac{U_n - I_n r_{я}}{\omega_n}$	$c\Phi = \dots\dots\dots$
$M_{on} = c\Phi (I_{я} \pm 0,5I_{nn})$	$M = \dots\dots\dots$

Двигательный, рекуперативный и противовключения тормозные режимы:

$I_{U_n} = I_{U_{on}} \frac{U_n}{U_{on}}$	$I_{U_n} = \dots\dots\dots$
$M_{U_n} = M_{U_{on}} \left(\frac{U_n}{U_{on}} \right)^2$	$M_{U_i} = \dots\dots\dots$
$M = \frac{2M_k (1 + \alpha s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\alpha s_k}$	$M = \dots\dots\dots$

Динамический тормозной режим:

$M_{np} = M_{on} \left(\frac{kI_n}{I_{on}} \right)^2$	$M_{np} = \dots\dots\dots$
--	----------------------------

3. Данные измерений и вычислений по результатам опытов (табл. 2.3 и 2.4).

Таблица 2.3. Опытные данные АД с КЗ ротором

Режим работы	Экспериментальные и расчетные данные							
	$I_{я},$ А	$I_{пт},$ А	$I_{ад},$ А	$I_{пр},$ А	$n_{оп},$ об/мин	$\omega_{оп},$ рад/с	$M_{оп},$ Н·м	$M_{пр},$ Н·м
Двигательный								
Противовключения								
Рекуперативный								
Динамический								

Таблица 2.4. Расчетные данные АД с КЗ

Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ω , рад/с										
S										
M , Н·м										

4. Графики отдельно механических и скоростных характеристик; на каждом из графиков приводятся характеристики всех режимов двигателя, полученные опытным и расчетным методами. Опытные и расчетные характеристики должны отличаться между собою расцветкой или типом линий. Выполнение графической части должно соответствовать требованиям ЕСКД.

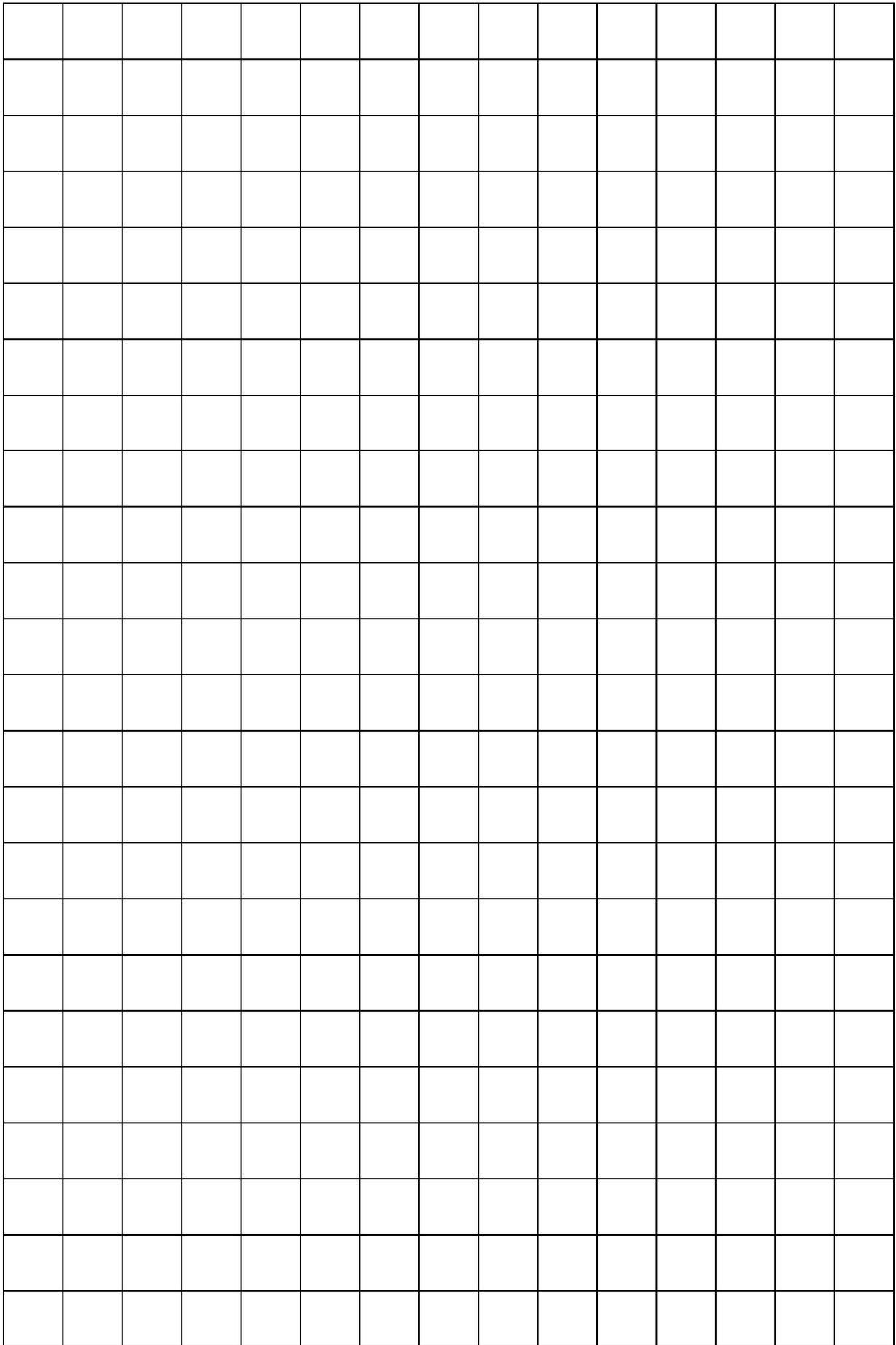
5. Заключение о проделанной работе

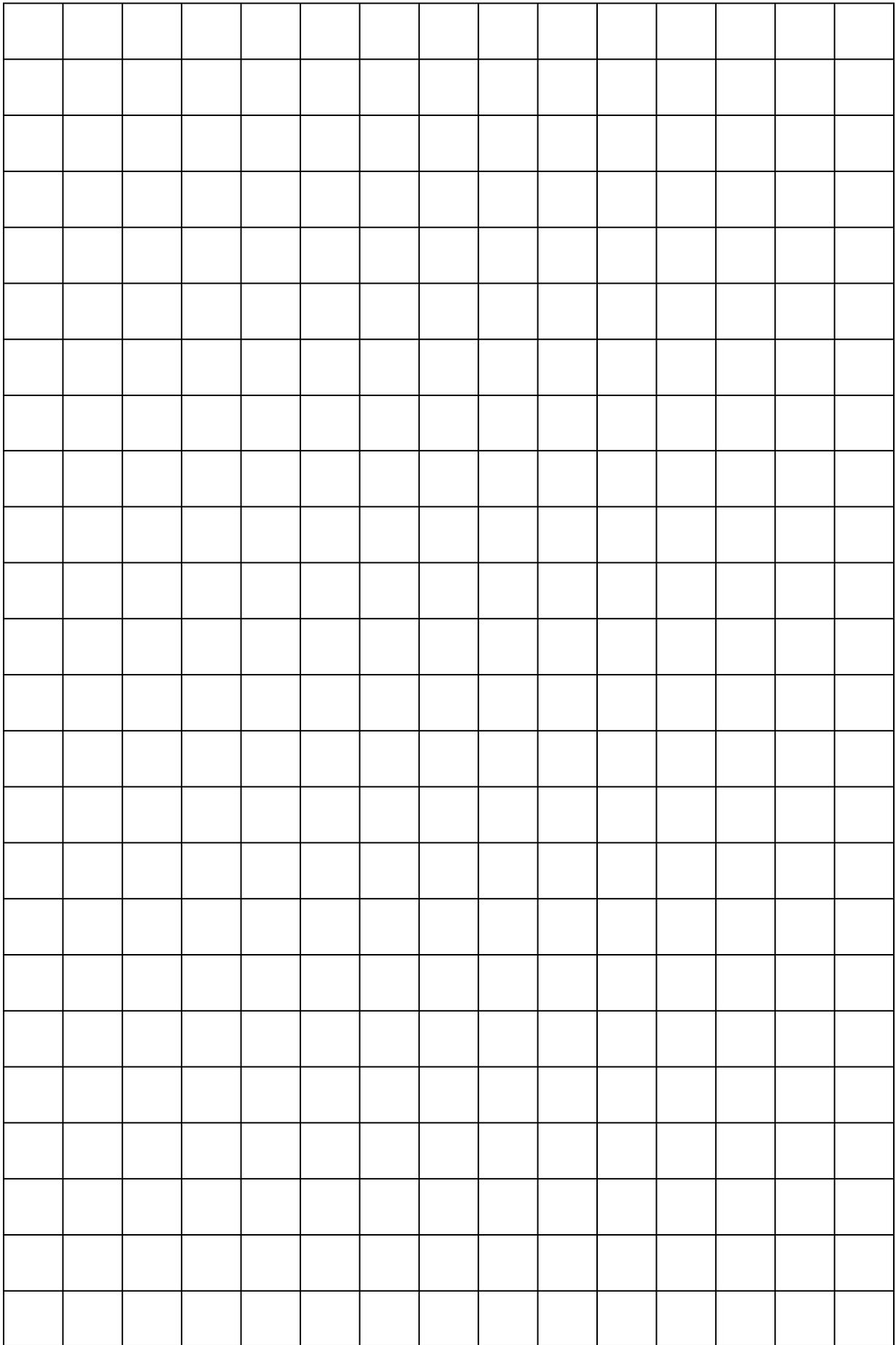
Контрольные вопросы

1. Поясните принцип работы АД.
2. Какие режимы работы существуют у АД ?
3. В чем состоит принципиальное отличие тормозного режима электродвигателя от двигательного?
4. Как перевести АД в режим динамического торможения?
5. Что такое пусковой ток двигателя?
6. Как изменяется момент АД при изменении напряжения питания?
7. Почему действительный пусковой момент короткозамкнутого двигателя не равен теоретическому?
8. Что такое кратность пускового момента?
9. Что такое кратность максимального момента?

Список рекомендуемых источников

1. Епифанов, А.П. Основы электропривода [Текст] : учебное пособие. — 2-е изд., стер. — СПб. : Лань, 2009. — 192 с. : ил.
2. Москаленко, В.В. Электрический привод [Текст] : учебник для вузов / В.В. Москаленко. — М. : Академия, 2007. — 368 с.
3. Фролов, Ю.М. Электрический привод [Текст] : учеб. пособие : в 2-х ч. Ч.1 / Ю.М. Фролов ; Воронежский ГТУ. — Воронеж : Кварта, 2004. — 116 с. — (Открытое образование).
4. Онищенко, Г.Б. Электрический привод [Текст] : учебник для вузов / Г.Б. Онищенко. — М. : Академия, 2006. — 288 с. — (Высшее профессиональное образование. Электротехника).
5. Шичков, Л.П. Электрический привод [Текст] : учебник для вузов / Л.П. Шичков. — М. : КолосС, 2006. — 279 с. : ил. — (Учебники и учеб. пособия для студентов вузов).
6. Чиликин, М.Г. Общий курс электропривода [Текст] / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. — М. : Энергоиздат, 1981. — 576 с. : ил.
7. Симоненко, А.С. Основы электропривода [Текст] : учебное пособие для студентов специальности 110302 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» очной и заочной форм обучения / сост. А.С. Симоненко. — Кострома : КГСХА, 2009. — 182 с.





Учебно-практическое издание

Электропривод : лабораторный практикум для студентов направлений подготовки 110800.62 «Агроинженерия» и 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника» очной и заочной форм обучения / сост. А.А. Васильков, И.В. Бушуев. — Караваево : Костромская ГСХА, 2013. — 34 с.

Гл. редактор Н.В. Киселева
Редактор выпуска Т.В. Тарбеева
Корректор Т.В. Кулинич