

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

Кафедра электропривода и электротехнологии

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

лабораторный практикум
для студентов направления подготовки 35.03.06
«Агроинженерия»
профиль «Технологическое оборудование для хранения и
переработки с.-х. продукции»
очной и заочной форм обучения

Каравеево 2015

УДК 621.34

ББК 31.291

Э 45

Составители: к.э.н., доцент кафедры электропривода и электротехнологий

Костромской ГСХА *А.А. Васильков*

к.т.н., доцент кафедры теоретических основ электротехники и

автоматики Костромской ГСХА *А.В. Рожнов*

Рецензент: _____

Рекомендовано к изданию методической комиссией факультета

электрификации и автоматизации сельского хозяйства,

протокол № _____ от _____ .

Э 45 **Электрооборудование и средства автоматизации** : Лабораторный практикум для студентов направления подготовки 35.03.06 «Технологическое оборудование для хранения и переработки с.-х. продукции» очной и заочной формы обучения [Текст]/ [А.А. Васильков, А.В. Рожнов]-Караваево : Костромская ГСХА, 2015. - __ с.

В издании содержится программы выполнения лабораторных работ, приведены краткие теоретические сведения, даны подробные указания по выполнению и обработки полученных в ходе выполнения лабораторных работ.

Лабораторный практикум предназначен для студентов направления подготовки 35.03.06 «Агроинженерия» профиль «Технологическое оборудование для хранения и переработки с.-х. продукции» очной и заочной формы обучения.

© ФГОУ ВПО Костромская ГСХА, 2015

© А.А. Васильков, А.В. Рожнов, составление, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Лабораторная работа № 1 «Исследование механических и электромеханических (скоростных) характеристик двигателя постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения» ...	6
Лабораторная работа № 2 «Подготовка к пуску асинхронного электродвигателя».....	21
Лабораторная работа № 3 «Исследование механической и электромеханической (скоростной) характеристик трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором» ...	29
Лабораторная работа № 4 «Проверка номинальной мощности электродвигателя по нагреву и определение постоянной времени нагрева»	48
Список рекомендуемых источников.....	63

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум подготовлен в соответствии с Государственным образовательным стандартом и примерной программой дисциплины «Электрооборудование и средства автоматизации» для студентов направления подготовки 35.03.06 «Агроинженерия».

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 следует самостоятельно проанализировать результаты лабораторных исследований и ответить на поставленные вопросы. С этой целью каждый раздел лабораторного практикума сопровождается контрольными вопросами.

В результате изучения дисциплины студент должен: понимать значение электрификации и автоматизации в деле повышения,

эффективности сельскохозяйственного производства;

знать:

– способностью к использованию основных законов естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применение методов математического анализа и моделирования;

– основы теории и методы расчета рационального электропривода

– принципы автоматического управления электроприводом машин, агрегатов и поточных линий в с.-х. производстве.

уметь:

– способностью использовать современные методы монтажа, наладки машин и установок, поддержания режимов работы электрифицированных и автоматизированных технологических процессов, непосредственно связанных с биологическими объектами

– применять средства измерения для контроля качества продукции и технологических процессов;

владеть:

– навыками работы с современными универсальными и специальными средствами измерения и контроля;

– способностью обеспечивать выполнение правил техники безопасности, производственной санитарии, пожарной безопасности и норм охраны труда и природы готовностью к участию в проектировании новой техники и технологии.

Настоящие методические указания написаны в соответствии с программой курса «Электропривод и электрооборудование», утвержденной Учебно-методическим объединением по инженерным специальностям, и учебными планами.

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 рис. 1.1.
3. Включить в работу лабораторный стенд и получить экспериментальные данные для построения характеристик исследуемого двигателя в двигательном, рекуперативном (при $R_{\delta}=0$ и $R_{\delta 1}\neq 0$) и режиме противовключения (при $R_{\delta 2}\neq 0$).
4. Отключить от сети лабораторный стенд и выполнить соединение аппаратуры в соответствии со схемой соединения, приведенной на рис. 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 положения

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:

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

где U – напряжение на зажимах якоря, В;
 I – ток протекающий по обмотке якоря, А;
 $r_{я}$ – сопротивление цепи якоря, Ом;
 R_{∂} – добавочное сопротивление в цепи якоря, Ом;
 c – конструктивная постоянная электродвигателя;
 Φ – магнитный поток, Вб;
 ω - угловая скорость, рад/с.

Уравнение механической характеристики:

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

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 характеристика имеет вид прямой линии. Поэтому для построения характеристик двигателя по паспортным данным достаточно определить две точки. Значение $c\Phi$ вычисляем по каталожным данным электродвигателя:

$$c\Phi = \frac{U_{н} - I_{н} \cdot r_{я}}{\omega_{н}}, \quad (1.3)$$

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

$$r_{я} = 0,5 \cdot U_{н} \cdot \frac{(1 - \eta_{н})}{I_{н}}, \quad (1.4)$$

где $\eta_{н}$ – КПД двигателя при номинальной мощности.

Добавочное сопротивление (R_d) измеряется прибором. Значение момента двигателя находится из выражения

$$M = c\Phi \cdot I_{я} \quad , \quad (1.5)$$

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 (М1) в различных режимах работы используется электромашинная 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 , а). 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.

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, - ω_0).

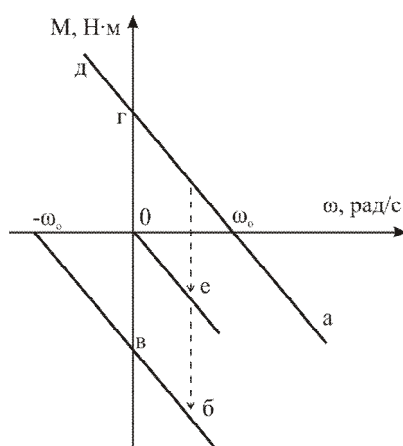


Рис.1.1. Механические характеристики ДПТ НВ

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 это напряжение U приложенное к якорию остается неизменным. Режим торможения начнется с момента остановки электродвигателя, после того как обороты двигателя станут отрицательными (рис. 1 участок характеристики - г, д).. 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 участок характеристики - $e, 0$). 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:

Таблица 1.1 Состав электрооборудования лабораторного стенда

№	Наименование	Усл. обоз. в схеме
1	Электромашинная нагрузка с асинхронным двигателем и двигателем постоянного тока	<i>M1</i> и <i>M2</i>
2	Преобразователь частоты	<i>UZI</i>
3	Амперметр	<i>PA1</i>
4	Вольтметр	<i>PV1</i>
5	Реостат возбуждения машины постоянного тока M1	<i>Rδ</i>
6	Выпрямитель	<i>VD1</i>
7	Указатель частоты вращения	<i>BR1</i>
8	Блок трехфазного питания	<i>C1</i>
9	Блок постоянного тока	<i>C3</i>

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 М1 и схемы включения на ДПТ НВ (М2) 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 рис. 1.2.

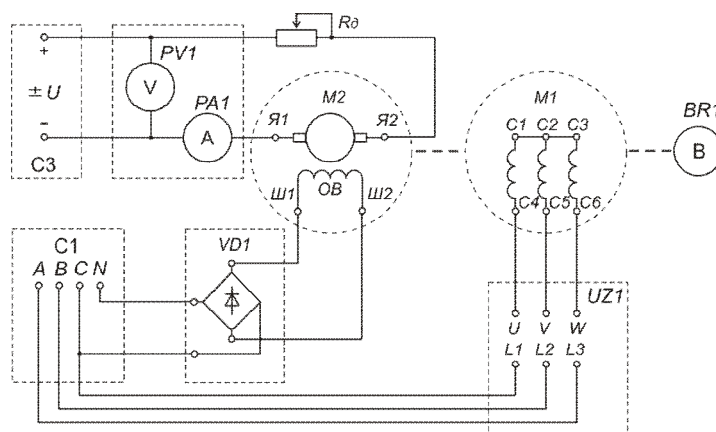


Рис. 1.2. Электрическая схема для снятия характеристик ДПТ НВ в двигательном и тормозных режимах (рекуперативном и противовключения)

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 М1 равную 0 рад/с

7. Нажать кнопку «RUN» блока *UZI* 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 *UZI*, 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 *UZI*;
- 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 *A1*, 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 рис. 1.3.

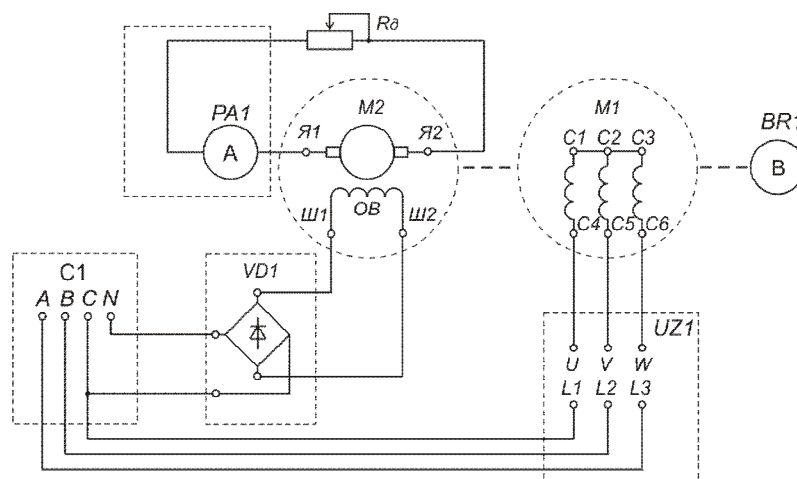


Рис. 1.3. Электрическая схема для снятия характеристик ДПТ НВ в динамическом тормозном режиме

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.
2. Основные расчетные формулы и примеры расчетов механических и скоростных характеристик в каждом режиме.
3. Таблица 1.3 с внесенными в нее данными измерений и вычислений по результатам опытов.
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 по 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?

ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 1

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

Таблица 1.2

1. Паспортные данные исследуемого двигателя.

Машина постоянного тока		M2
Номинальная полезная мощность, кВт	P_n	
Номинальное напряжение якоря, В	$U_{ня}$	
Номинальный ток якоря, А	$I_{ня}$	
Номинальное напряжение обмотки возбуждения, В	$U_{нв}$	
Номинальный ток обмотки возбуждения, А	$I_{нв}$	
Номинальная частота вращения, мин. ⁻¹	n_n	
КПД, %	η_n	

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

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

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30} \quad \omega_n = \dots\dots\dots$$

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

Двигательный режим:

1. $R_{\partial} = 0$

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

$$M = c\Phi \cdot I_{я} \quad (1.5) \quad M = \dots\dots\dots$$

Рекуперативный режим:

$$2. R_{\partial} \neq 0$$

$$R_{\partial 1} = \dots\dots\dots$$

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{r_{я} + R_{\partial}}{c\Phi} \cdot I$$

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

$$M = c\Phi \cdot I_{я}$$

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

Режим противовключения:

$$3. R_{\partial} \neq 0$$

$$R_{\partial 1} = \dots\dots\dots$$

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{r_{я} + R_{\partial}}{c\Phi} \cdot I$$

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

$$M = c\Phi \cdot I_{я}$$

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

Динамический тормозной режим:

$$4. R_{\partial} \neq 0$$

$$R_{\partial 1} = \dots\dots\dots$$

$$\omega = -\frac{r_{я} + R_{\partial}}{c\Phi} \cdot I$$

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

$$M = c\Phi \cdot I_{я}$$

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

Таблица 1.3 Опытны и расчетные данные ДПТ НВ

Напряжение на зажимах якоря, В		$U=$ _____				
Режим работы	Условия опыта	Экспериментальные и расчетные данные				
		$I_{я}, А$	$n, 1/мин$	$\omega_{оп}, 1/с$	$\omega_{расч}, 1/с$	$M, Нм$
2. Двигательный	$R_{\delta}=0$					
3. Двигательный	$R_{\delta 1} = \text{_____}$					
4. Рекуперативный	$R_{\delta 1} = \text{_____}$					
5. Рекуперативный	$R_{\delta} = 0$					
6. Противовключен ия	$R_{\delta 2} = \text{_____}$					
7. Динамический	$R_{\delta 1} = \text{_____}$					
8. Динамический	$R_{\delta 2} = \text{_____}$					

5. Заключение о проделанной работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Подготовка к пуску асинхронных электродвигателей

Цель работы: Практически овладеть основными приемами подготовки и пуска асинхронных электродвигателей (АД). Научиться строить механическую характеристику АД по паспортным данным.

Программа работы

1. Ознакомиться с паспортными данными электродвигателя.
2. Научиться проверять сопротивление изоляции обмоток статора АД.
3. С помощью прибора научиться определять начало и конец обмоток статора АД.
4. Включить АД в трехфазную сеть при соединении обмоток статора в «звезду» и «треугольник» и убедиться в его нормальной работе.
5. Составить отчет по работе.
6. Сопоставить результаты построения механических характеристик по паспортным данным. Сделать выводы.

Основные теоретические положения

Для обеспечения паспортной мощности АД его подключают к электрической сети по схеме «треугольник» - (Δ) или «звезда» - (Y), которая обеспечивает подведение номинального напряжения к обмоткам статора. В настоящее время наиболее распространенными значениями напряжения сети являются 380 В или 220 В. На рисунке

2.1 приведены общепринятые стандартные обозначения начала и конца всех трех обмоток статора, подключаемых к клеммной колодке электродвигателя.

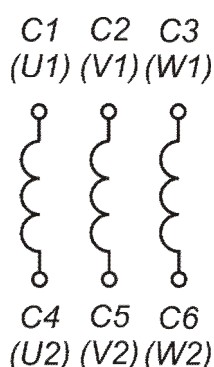


Рис. 2.1. Стандартная маркировка выводов обмоток трехфазного АД

Схема подключения обмоток статора АД к его клеммной колодке приведена на рисунке 2.2а, схема соединения перемычек на клеммной колодке при включении обмоток «звезда» показана на рисунке 2.2б, а «треугольник» - на рисунке 2.2в.

Для соединения АД по схеме «звезда» (Y) (рисунок 2.2а) все концы обмоток статора - C4, C5, C6 (или все их начала - C1, C2, C3) объединяют при помощи перемычек вместе, а к свободным началам обмоток - C1, C2, C3 (или к их концам - C4, C5, C6) подводят напряжение трехфазной сети переменного тока - фазы А, В, С. Для соединения АД по схеме «треугольник» (рисунок 2.2в) обмотки статора при помощи перемычек соединяют вместе попарно - C1 и C6, C2 и C4, C3 и C5, а к местам их соединения подводят напряжение сети (фазы А, В, С). В обоих случаях все обмотки статора АД будут соединены согласованно и при подаче на них напряжения питания внутри статора образуется вращающееся электромагнитное поле, создающее вращающий момент на валу двигателя.

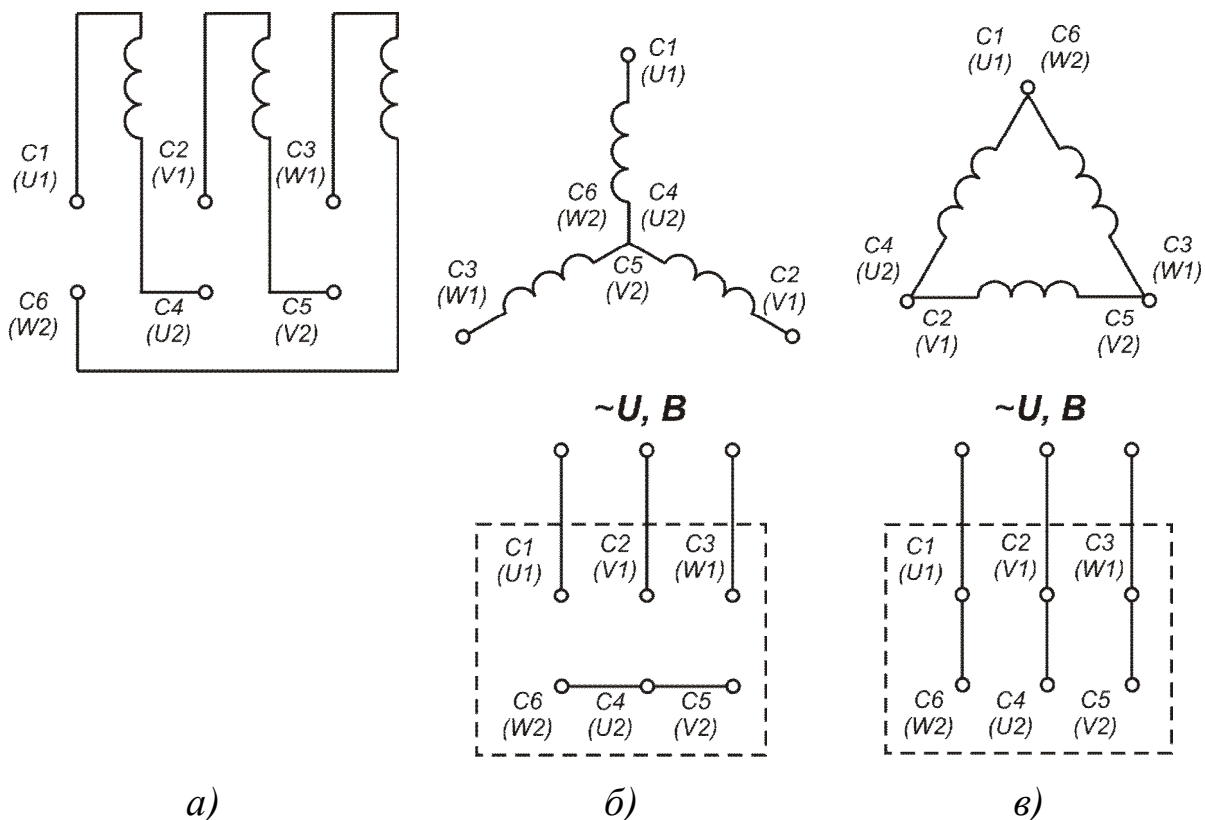


Рис. 2.2 Схемы соединения обмоток статора АД: а – клеммной колодке; б – соединением «звезда»; в – соединением «треугольник»

Если в процессе эксплуатации или после ремонта АД произойдет разрушение клеммной колодки и будет отсутствовать маркировка выводов начала и конца обмоток статора, то для правильного подключения АД к электрической сети требуется определить сами обмотки и найти их начала. В противном случае обмотки статора АД могут быть подключены к сети неправильно и вместо вращающегося электромагнитного поля будет получено пульсирующее поле, двигатель в этом случае не сможет развить паспортные значения момента и угловой скорости на валу.

В процессе эксплуатации электродвигателей требуется периодически проводить проверку сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса. Кроме того, прежде чем приступить к определению выводов обмоток статора требуется проверить

сопротивление изоляции каждого вывода всех обмоток относительно корпуса двигателя.

Для электродвигателей с рабочим напряжением до 1000 В сопротивление изоляции обмоток статора относительно корпуса и сопротивление изоляции между обмотками должно быть не менее 500 кОм при температуре 10 ... 30°C. При понижении сопротивления изоляции, двигатель подвергается сушке.

Порядок выполнения работы

а) Определение изоляции обмоток

Сопротивление изоляции электроаппаратов проверяют при помощи мегомметра. Мегомметр имеет две клеммы для подключения исследуемого объекта, это клемма *Л* для подключения линии, и клемма *З*, для подключения «земли». Для проведения измерений при нагрузке, подключенной к клеммам *Л* и *З*, требуется вращать рукоятку мегомметра, приводящую в работу внутренний генератор прибора. Отсчет значений сопротивления проводится по шкале мегомметра.

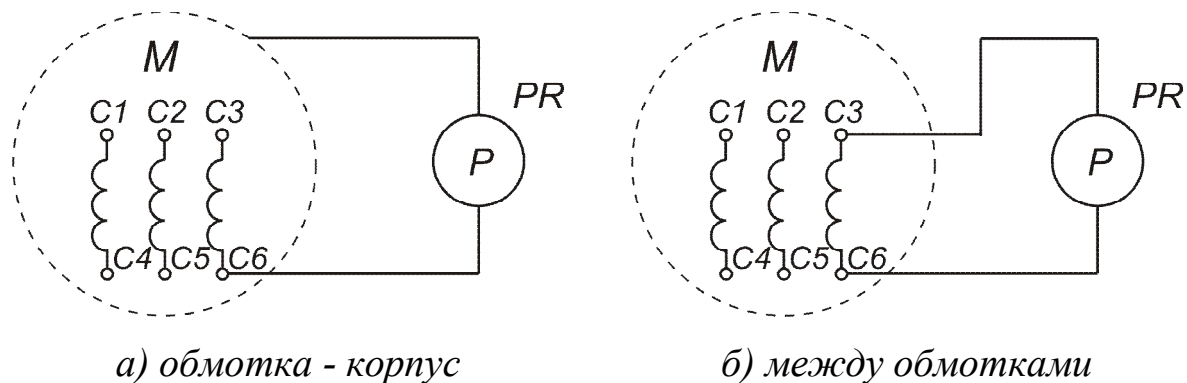


Рис.2.3. Измерение сопротивления изоляции

При помощи мегомметра можно определить выводы, принадлежащие каждой обмотке. В этом случае при проведении измерений прибор покажет нулевое значение сопротивления цепи, т. е.

«короткое», только для тех двух выводов, которые принадлежат одной и той же обмотке. Но определить начало и конец обмотки при помощи мегомметра нельзя.

б) Маркировки выводов обмотки статора

Существуют несколько известных классических методов определения «начал» и «концов» обмоток. Это: а) Метод пробного пуска; б) Методы трансформации с последовательным соединением 2-х или 3-х обмоток и контролем напряжения по вольтметру; в) Метод с источником постоянного напряжения (аккумулятор) и гальванометра, отключения и включения которого показывают соответствия полярности двух обмоток по сравнению с коммутируемой. Но есть еще один метод, который упрощает запоминание методики и не требует никаких источников питания, контрольно-измерительных приборов с большими пределами измерения, двигатель не пускается и не разгоняется, по обмоткам не текут большие токи, от которых они могут серьезно пострадать, если не ограничивать время тестирования до 2-3 секунд, подходит для АД любой мощности и частоты вращения.

Электротехническая сталь ротора имеет малый остаточный магнитный поток (Φ). При вращении ротора от руки с малой частотой (f_2), в витках (w_1) будет наводиться мизерная электродвижущая сила (E).

$$E = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_2 \cdot w_1$$

Получаем аналог синхронного генератора (рис. 4).

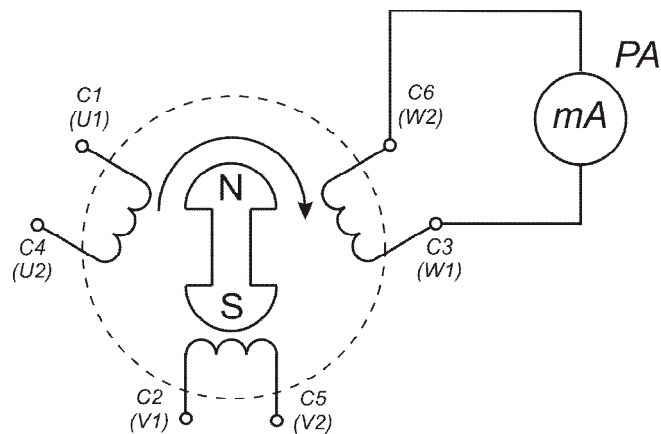


Рис. 2.4. Тестирование обмоток статора по принципу синхронного генератора

Если теперь подключиться к выводам одной фазы милли- (микро) амперметром (вольтметром) магнитоэлектрической системы (или мультиметром, тестером) постоянного тока, то при толчковом вращении ротора от руки короткими прерывистыми движениями будет наблюдаться заметное отклонение стрелки от нуля по шкале влево (-) и вправо (+) за 1 оборот. Таким образом:

1. Прозваниваем три фазные обмотки статора на обрыв или на целостность;
2. Контролируем наличие или отсутствие короткого замыкания через поврежденную изоляцию, то есть гальваническую связь между обмотками (при 6-ти выводах на клеммнике) и корпусом;
3. Также определяем количество полюсов ($2P$). Например, за один оборот ротора АД.

Стрелочный указатель прибора отклонился от нуля один раз влево и один раз вправо, (на дисплее мультиметра это будет изменение полярности полуволн наводимых фазных ЭДС от полюсов) – значит имеем один южный и один северный полюс, то есть $2P = 2$ полюса или $P = 1$ пара. По числу полюсов определяется частота вращения магнитного поля статора n_1 .

$$\left(n_1 = \frac{60f}{P} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \text{ об/мин.} \right).$$

Если теперь у прозвонившихся фаз обмоток статора соединим действительные три «начала» в один узел, а три «конца» – в другой и подключим к ним тот же миллиамперметр (вольтметр), то при вращении ротора от руки с небольшой частотой вращения стрелочный указатель будет чуть колебаться около нуля, так как геометрическая сумма трех векторов фазных напряжений обмоток будет равна нулю (рис. 2.5). Если же колебания стрелки далеки от нуля (как при прозвонке фаз, пункт 1), то это значит, что перевернута какая-то одна фаза из трех, которая отыскивается поочередным присоединением условных «начал» и «концов» до индикации устойчивого нуля по прибору.

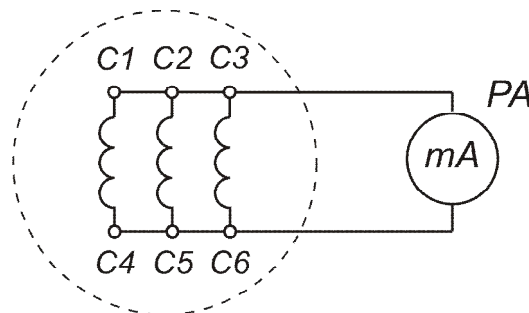


Рис. 2.5 Схема соединения обмоток статора АД для тестирования на правильность определения «начала» и «конца»

Содержание отчета

1. Паспортные данные электродвигателя.
2. Основные части двигателя и их назначение.
3. Схемы маркировки статорной обмотки двумя методами.
4. Расположение выводов на клеммном щитке.

5. Схемы включения двигателя в сеть:
 - а) по схеме "звезда"
 - б) по схеме "треугольник".
6. Результаты измерения сопротивления изоляции обмоток по отношению к корпусу и между собой.
7. Построенная механическая характеристика АД по паспортным данным.
8. Заключение по работе.

Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип работы асинхронного двигателя.
2. Почему исследуемые электродвигатели называются асинхронными?
3. Что такое скольжение?
4. Как определяется частота вращения магнитного поля статора двигателя?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

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 рис. 3.1.
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 на рис. 3.2.
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 рис. 3.3.

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 положения

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 вращающегося 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:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}, \quad (3.1)$$

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:

$$M = \frac{2M_k(1 + \alpha s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\alpha s_k}, \quad (3.2)$$

где - M_k - максимальный момент двигателя,

s_k - критическое скольжение;

α - отношение сопротивлений.

$$\alpha = \frac{r_1}{r_2} \approx 1 \quad (3.3)$$

Величины, используемые в уравнениях 3.4 - 3.9, определяются по паспортным и каталожным данным:

$$M_k = \mu_k M_H, \quad (3.4)$$

где μ_k - кратность максимального момента,

M_H - номинальный момент двигателя, определяется из выражения:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} \quad (3.5)$$

В свою очередь ω_H - номинальная угловая скорость:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} \quad (3.6)$$

где n_H - номинальная частота вращения вала двигателя.

Критическое скольжение определяют по формуле:

$$s_k = \frac{s_H \left[\mu_K + \sqrt{\mu_K^2 + 2s_H(\mu_K - 1)} - 1 \right]}{1 - 2s_H(\mu_K - 1)} \quad (3.7)$$

где s_H - номинальное скольжение:

$$s_H = \frac{\omega_O - \omega_H}{\omega_O} \quad (3.8)$$

ω_O - синхронная частота вращения ротора. Угловая скорость вращающегося магнитного поля определяется из выражения:

$$\omega_O = \frac{2\pi f_1}{p} \quad (3.9)$$

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. 3.1 участок характеристики - ω_O , а).

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.

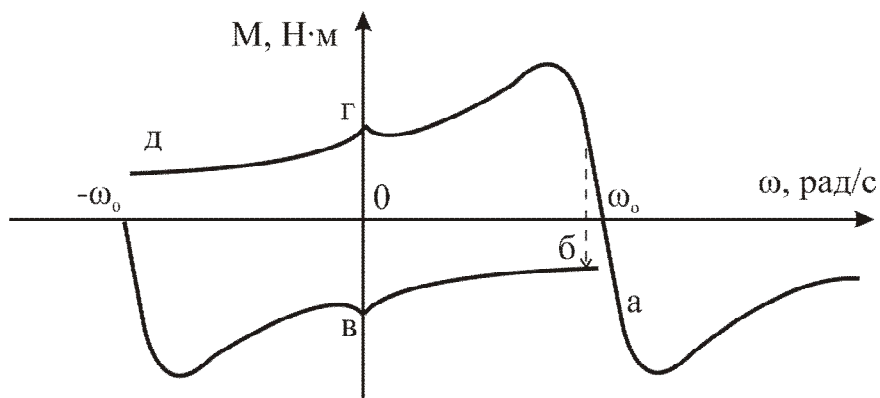


Рис. 3.1. Механические характеристики АД

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. 3.1 участок характеристики - б, 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. 3.1 участок характеристики - г, д). 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. 3.2 участок характеристики - е, ж).

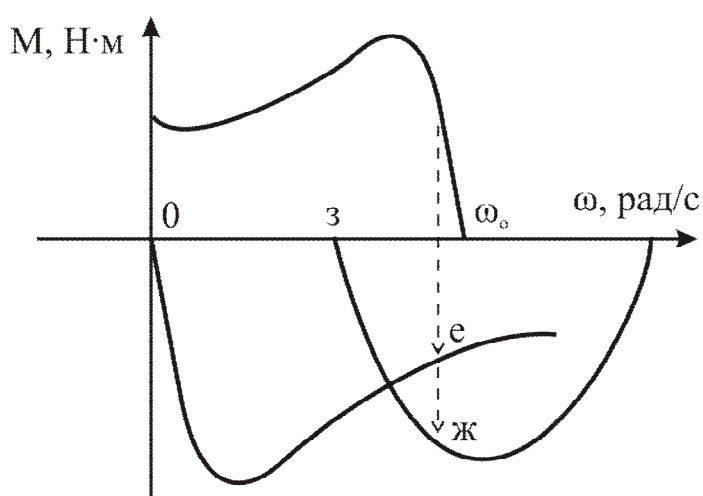


Рис. 3.2. Механические характеристики АД

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, индуктируемый 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 $\omega_e \geq (0,3...0,5) \cdot \omega_i$ (рис. 3.2 участок характеристики - ж, 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:

Таблица 3.1 Состав электрооборудования лабораторного стенда

№	Наименование	Усл. обоз. 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>Rδ</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 электромашинной 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:

$$M_{U_H} = M_{U_{on}} \cdot \left(\frac{U_H}{U_{on}} \right)^2, \quad (3.10)$$

где M_{U_H} - момент двигателя полученный из опытов при пониженном напряжении;

U_H – номинальное напряжение при данной схеме соединения обмоток двигателя;

U_{on} – напряжение на обмотке двигателя при опыте,

для токов:

$$I_{U_H} = I_{U_{on}} \cdot \frac{U_H}{U_{on}}, \quad (3.11)$$

где I_{U_H} - 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 $I_{nn}=f(\omega)$. Момент на валу испытуемого двигателя определится как:

$$M = c\Phi \cdot (I_{я} \pm 0,5 \cdot I_{nn}) , \quad (3.12)$$

где: I_{nn} - 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:

$$c\Phi = \frac{U_H - I_H r_{я}}{\omega_H} , \quad (3.13)$$

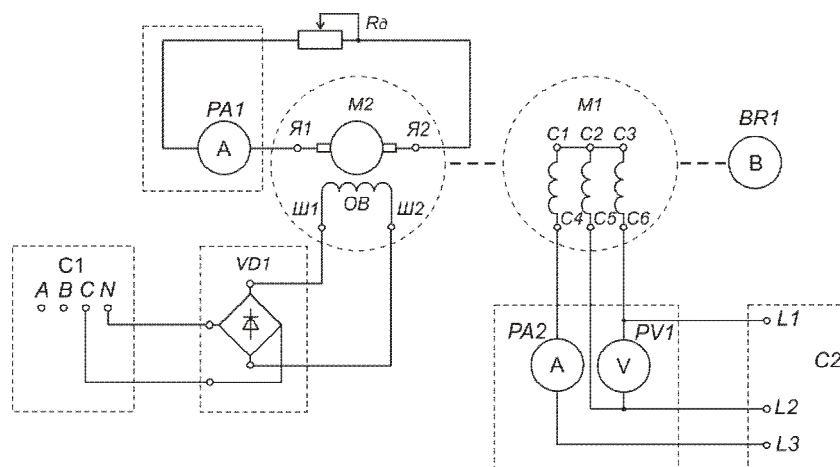
где $r_{я}$ - сопротивление обмотки якоря, определяемое из выражения:

$$r_{я} = 0,5 \cdot U_H \cdot \frac{(1 - \eta_H)}{I_H} , \quad (3.14)$$

где η_H - 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 рис. 3.3.
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 $C2$.



*Рис. 3.3. Электрическая схема для снятия характеристик АД
в двигательном режиме*

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 заносим в таблицу 3.3.

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 рис. 3.4.

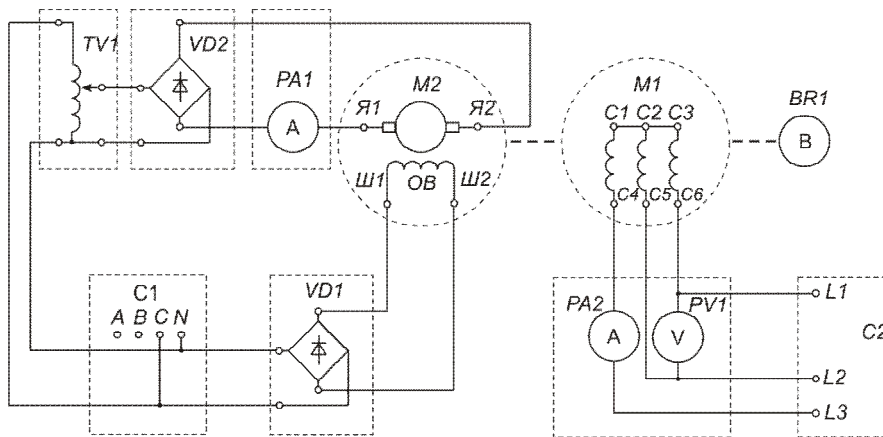


Рис. 3.4. Электрическая схема для снятия характеристик АД в тормозных режимах рекуперативный и противовключения

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 стрелки 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, показания приборов и занести в таблицу 3.3.

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 3.3.

16. Значение приведенного тока I_{np} (столбец 6 в таблице 3.3) определяется по формуле 3.11.

17. Определить опытный момент электродвигателя M_{on} (столбец

9 в таблице 3.1) по формуле 3.11.

18. Снятую при пониженном напряжении механическую характеристику двигателя $M_{on}=f(\omega)$ привести к номинальному напряжению $M_{np}=f(\omega)$ (столбец 10 в таблице 3.4) по формуле 3.10.

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 электрической соединений, приведенной на рис. 3.5.

21. Включить автоматический выключатель блока $C3$, и выставить реостатом Rd 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 3.3.

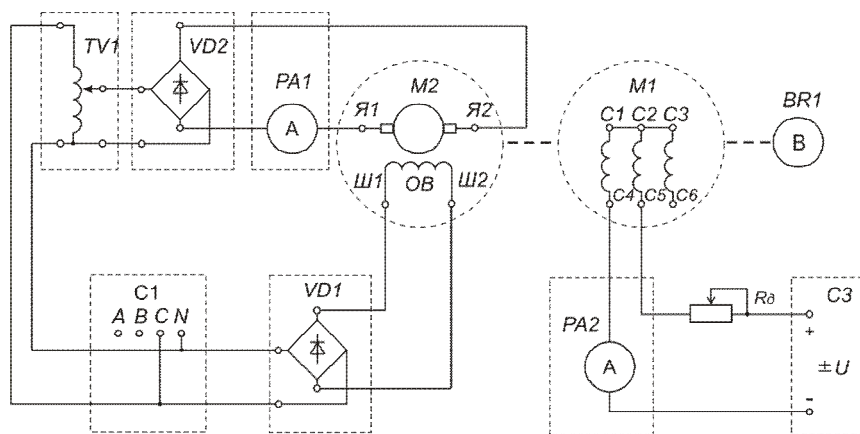


Рис. 3.5. Электрическая схема для снятия характеристик АД в динамическом тормозном режиме

24. Значения моментов в динамическом тормозном режиме M_{on} (столбец 9 в таблице 3.3) вычислить по формуле (3.12).

25. Полученные значения моментов M_{on} необходимо привести к эквивалентному номинальному току статора по формуле (3.15):

$$M_{np} = M_{on} \cdot \left(\frac{k \cdot I_{on}}{I_H} \right)^2, \quad 3.15$$

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 3.2. В связи с введением в формулу Клосса (3.2) корректировки, она пригодна к использованию только при положительных значениях момента АД. Результаты расчетов занести в таблицу 3.4.

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

1. Паспортные данные исследуемого двигателя в таблица 3.2.
2. Таблица 3.3 и 3.4 с внесенными в нее данными измерений и вычислений по результатам опытов.
3. Примеры расчетов механических и скоростных характеристик в каждом режиме.
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 по 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?

ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 3

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

Таблица 3.2 Паспортные данные исследуемого двигателя.

Наименование параметров	Значения
Асинхронный двигатель	M1
Номинальная полезная мощность P_H , кВт	
Схема соединения обмоток	Δ / Y
Номинальное напряжение U_H , В	/
Номинальный ток статора I_H , А	/
Кратность пускового тока, $i_n = I_n / I_H$	
Кратность пускового момента μ_n	
Кратность минимального момента μ_{\min}	
Кратность максимального момента μ_k	
Коэффициент мощности $\cos \varphi_H$	
Номинальные обороты вращения n_H , об/мин	
Номинальное скольжение s_H , %	
КПД η_H , %	

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

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} \quad (3.9) \quad \omega_0 = \dots\dots\dots$$

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} \quad (3.6) \quad \omega_H = \dots\dots\dots$$

$$s_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} \quad (3.1) \quad s_H = \dots\dots\dots$$

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} \quad (3.5) \quad M_H = \dots\dots\dots$$

$$M_k = \mu_k M_H \quad (3.4) \quad M_k = \dots\dots\dots$$

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

Основные расчетные формулы и примеры расчетов для нагрузочной машины и «прибора» двигателя постоянного тока М1

$$r_{\text{я}} = 0,5 \cdot U_{\text{н}} \cdot \frac{(1 - \eta_{\text{н}})}{I_{\text{н}}} \quad (3.14) \quad r_{\text{я}} = \dots\dots\dots$$

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{н}}}{30} \quad \omega_{\text{н}} = \dots\dots\dots$$

$$c\Phi = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} \cdot r_{\text{я}}}{\omega_{\text{н}}} \quad (3.13) \quad c\Phi = \dots\dots\dots$$

$$M_{\text{он}} = c\Phi \cdot (I_{\text{я}} \pm 0,5 \cdot I_{\text{нн}}) \quad (3.12) \quad M = \dots\dots\dots$$

Двигательный, рекуперативный и противовключения тормозные режимы:

$$I_{U_{\text{н}}} = I_{U_{\text{он}}} \cdot \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{он}}} \quad (3.11) \quad I_{U_{\text{н}}} = \dots\dots\dots$$

$$M_{U_{\text{н}}} = M_{U_{\text{он}}} \cdot \left(\frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{он}}} \right)^2 \quad (3.10) \quad M_{U_{\text{н}}} = \dots\dots\dots$$

$$M = \frac{2M_{\text{к}}(1 + \alpha s_{\text{к}})}{\frac{s}{s_{\text{к}}} + \frac{s_{\text{к}}}{s} + 2\alpha s_{\text{к}}} \quad (3.2) \quad M = \dots\dots\dots$$

Динамический тормозной режим:

$$M_{\text{пр}} = M_{\text{он}} \cdot \left(\frac{k \cdot I_{\text{н}}}{I_{\text{он}}} \right)^2 \quad (3.15) \quad M_{\text{пр}} = \dots\dots\dots$$

5. Заключение о проделанной работе.

Таблица 3.3. 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								
Противовключе- ния								
Рекупера- тивный								
Динамический								

Таблица 3.4 Расчетные данные АД с КЗ

ω , рад/с									
S									
M , Н·м									

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Проверка номинальной мощности электродвигателя по нагреву и определение постоянной времени нагрева

Цель работы: Исследование процесса нагрева электродвигателя при постоянной нагрузке и определение основных параметров нагрева опытным путем.

Программа работы

1. Ознакомиться с электрооборудованием лабораторного стенда. Изучить его устройство и принцип работы, записать паспортные данные приборов и исследуемого электродвигателя.
2. Собрать схему для проведения опыта. Выполнить соединение аппаратуры в соответствии со схемой соединения, приведенной на рис. 4.2.
3. Снять зависимость превышения температуры электродвигателя от времени при постоянной нагрузке опытным путем.
4. Построить кривую нагрева по опытным данным.
5. Определить установившееся значение превышения температуры двигателя.
6. Определить постоянную времени нагрева тремя методами.
7. Определить номинальную мощность электродвигателя.
8. Построить кривую нагрева по данным аналитических расчетов при той же нагрузке.
9. Пересчитать мощность двигателя на работу при температуре окружающей среды, не равной расчетной.

Основные теоретические положения

При всяком преобразовании одного вида энергии в другой часть потребляемой энергии теряется и преобразуется в тепловую. Разность между потребляемой мощностью и отдаваемой называют потерями и для удобства при сравнении с мощностью машины оценивают в единицах мощности (Вт или кВт). Потери в электродвигателях в зависимости от вызывающих их физических процессов подразделяют на электрические, магнитные, механические, вентиляционные и добавочные. Потери энергии в двигателе вызывает нагрев отдельных его частей. Особенностью электрических машин является тесное конструктивное сочетание металлов и изоляции, т.е. материалов, имеющих резко различные тепловые характеристики. В то время как металлы сохраняют свои рабочие свойства при температурах до 400... 500 °С и выше, верхний предел допустимого нагрева изоляционных материалов, применяемых в электромашиностроении, в зависимости от класса их нагревостойкости составляет 90... 180 °С. Изоляционные материалы, применяемые в электрических машинах согласно ГОСТ 8865-70, делятся на шесть основных классов нагревостойкости. Чем больше нагревостойкость изоляционных материалов, тем меньше размеры двигателя при одинаковой мощности, или больше мощность при тех же его размерах. Лучшему использованию двигателя способствует так же более совершенная система его охлаждения.

Превышение температуры двигателя зависит от нагрузки, так как с увеличением нагрузки возрастают потери в двигателе. Температура среды влияет на величину допустимой нагрузки двигателя. Чем выше температура окружающей среды, тем ниже допустимое превышение температуры, а следовательно, и допустимая

нагрузка двигателя. За расчетную принята температура окружающей среды $+40^{\circ}\text{C}$. Указываемая в паспорте двигателя номинальная мощность, соответствует этой температуре.

О тепловых свойствах двигателя можно судить по кривой нагрева, представляющей собой зависимость изменения превышения температуры двигателя от времени. Аналитическая зависимость превышения температуры двигателя от времени выражается формулой:

$$\tau = \tau_{уст} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_H}} \right) + \tau_0 \cdot e^{-\frac{t}{T_H}}, \quad (4.1)$$

где: τ - превышение температуры, град;

$\tau_{уст}$ - установившееся превышение температуры, град;

τ_0 - начальное превышение температуры, град;

t - время нагрева, с;

T_H - постоянная времени нагрева, с.

Если перед включением двигателя в работу его температура была равной температуре окружающей среды, то начальное превышение температуры $\tau_0=0$.

На рис 4.1 показаны кривые нагрева при $\tau_0=0$ (кривая 1) и при $\tau_0 \neq 0$ (кривая 2). После включения двигателя в работу с постоянной нагрузкой его температура растет и через определенное время наступает тепловое равновесие, когда превышение температуры достигает своего установившегося значения (строго говоря, это время равно бесконечности, но для практических расчетов его принимают конечным).

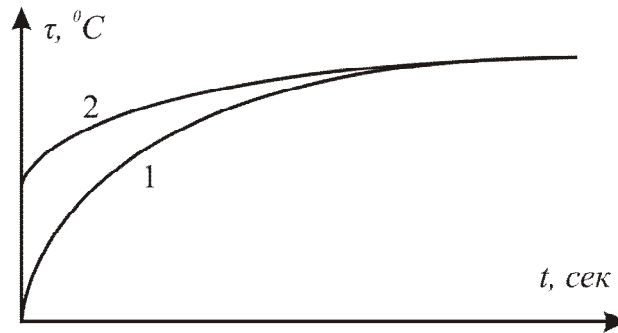


Рис. 4.1 Кривые нагрева превышения температуры двигателя

Величина, характеризующая скорость процесса нагревания, называется постоянной времени нагрева - T_n . Принято считать, что двигатель достигает своей установившейся температуры по истечении 4...5 постоянной времени нагрева.

Для определения ориентировочного значения постоянной времени нагрева можно использовать паспортные данные двигателя.

Из паспорта двигателя и каталогов известны :

P_n номинальная (паспортная) мощность двигателя, Вт;

η_n номинальный КПД двигателя;

m масса двигателя, кг;

τ_n номинальная превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$;

$$\tau_n = \theta_d - \theta_o \quad , \quad (4.2)$$

где: θ_d – допустимая температура изоляции двигателя в зависимости от класса их нагревостойкости, $^{\circ}\text{C}$;

θ_o – расчетная температура окружающей среды $+40^{\circ}\text{C}$.

Постоянную времени нагрева для электродвигателя находят по выражению:

$$T_n = \frac{C}{A} \quad , \quad (4.3)$$

где: C – теплоемкость двигателя, Дж/ $^{\circ}$ С;

$$C = c_o \cdot m, \quad (4.4)$$

где c_o —удельная теплоемкость, обычно принимается по стали ($c_o=500$, Дж/(кг $^{\circ}$ С));

A – теплоотдача двигателя, Дж/ $^{\circ}$ С

$$A = \frac{\Delta P_n}{\tau_n}, \quad (4.5)$$

где: ΔP_n – номинальные потери мощности двигателя, Вт

$$\Delta P_n = P_n \frac{1-\eta_n}{\eta_n}, \quad (4.6)$$

Более точно постоянную времени нагрева определяют одним из экспериментальных методов. При их использовании проводится опыт нагрева двигателя при постоянной нагрузке и определяется установившееся превышение температуры.

1. Метод определения установившегося превышения температуры ($\tau_{уст}$).

1.1. По данным опыта нагрева, строится график $\tau=f(t)$, который имеет свойства экспоненциальной кривой.

1.2. На оси абсцисс произвольном участке откладываются два одинаковых отрезка времени Δt (рис. 4.2). Достоверность определения $\tau_{уст}$ будет тем выше, чем большими на опытной кривой $\tau=f(t)$ будут приняты отрезки времени Δt .

1.3. На границах этих отрезков проводятся вертикали до пересечения с кривой нагрева. Через полученные точки 1, 2 и 3 проводятся горизонтальные линии, между которыми заключены приращения температуры $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$ соответствующие приращениям времени.

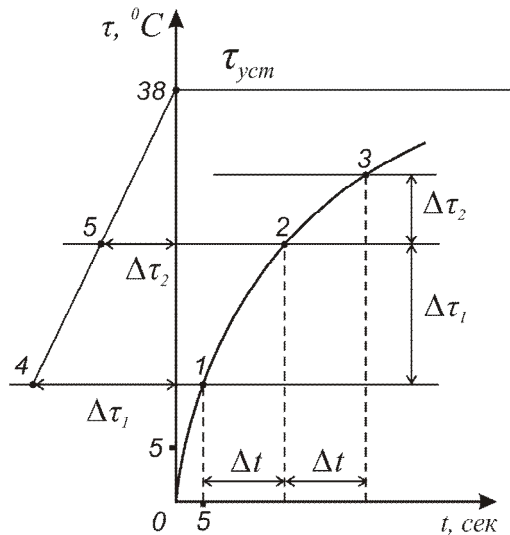


Рис 4.2 Определение установившегося превышения температуры двигателя

1.4. На горизонтальной линии с точкой 1 влево (или вправо) от оси ординат откладывается в том же масштабе отрезок $\Delta\tau_1$ и получают точку 4. Аналогично, на горизонтальной линии с точкой 2 откладывается отрезок $\Delta\tau_2$ и получают точку 5. Через полученные точки 4 и 5 проводится наклонная прямая до пересечения с осью ординат. Точка пересечения этой прямой с осью ординат определяет величину установившегося превышения температуры $\tau_{уст}$. На рисунке 4.2 значение установившегося превышения температуры $\tau_{уст} = 38^{\circ}\text{C}$.

2. Определение постоянной времени нагрева (T_n) методом начального нагрева. Если нагрев двигателя начинается при условии

$\tau_{нач}=0$, то он происходит в соответствии с уравнением ($\tau = \tau_{нач} e^{-\frac{t}{T_n}}$) и по истечении времени $t=T_n$ превышение температуры достигает $0,632\tau_{уст}$.

2.1. Определив в соответствии с п.1.1 – 1.4 установившегося превышение температуры ($\tau_{уст}$) строим на оси ординат точку 6 ($\tau = 0,632\tau_{уст}$). На рисунке 4.3 значение точки 6 равно $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\tau = 0,632 \cdot \tau_{уст} = 0,632 \cdot 38 = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$).

2.2. Из полученной точки 6 проецируем на опытную кривую нагрева $\tau=f(t)$ в точку 7. Из точки 7 спускаем проекцию на ось абсцисс в точку 8. Отрезок заключенный между началом координат и точкой 8 на оси абсцисс и есть **постоянная времени нагрева** (T_n). На рисунке 4.3 значение постоянной времени нагрева равно $T_n = 20,6$ мин.

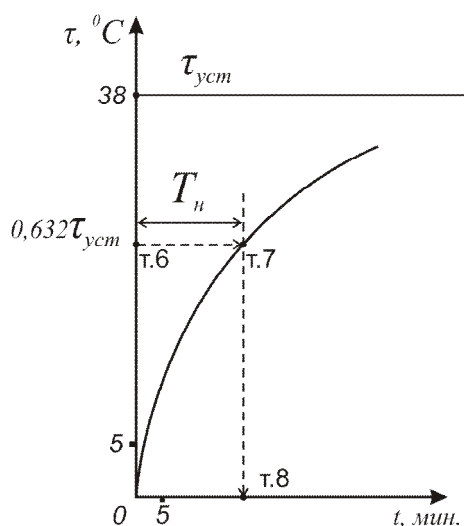


Рис 4.3 Определение постоянной времени нагрева методом начального нагрева

Аналогично по графику кривой охлаждения можно определить постоянную времени охлаждения. Для этого на оси ординат следует отложить величину $0,368\tau_{уст}$, провести горизонтальную линию до пересечения с кривой охлаждения и точку пересечения спроецировать на ось абсцисс. Отрезок на оси времени от нуля до проекции точки пересечения дает искомую величину постоянной времени охлаждения T_o (рис. 4.4).

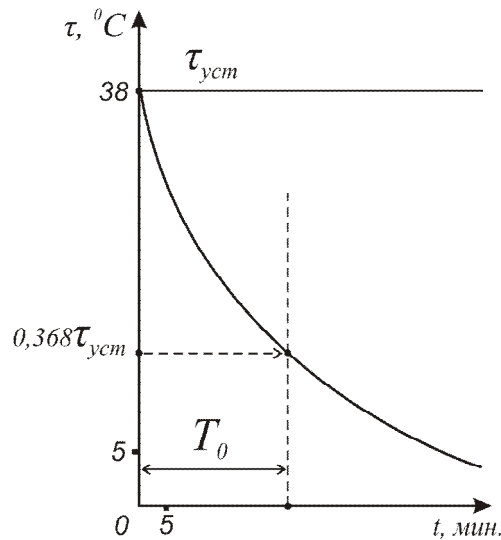


Рис 4.4 Определение постоянной времени охлаждения методом начального нагрева

3. Метод касательных. Метод касательных основан на том свойстве экспоненты, что в любой точке кривой величина отрезка на оси абсцисс, заключенная между проекцией точки касания и проекцией точки пересечения касательной с линией $\tau_{уст}$ на эту ось и есть постоянная времени нагрева ($t_2 - t_1 = T_n$). На рисунке 4.5 значение постоянной времени нагрева равно $T_n = 20,6$ мин.

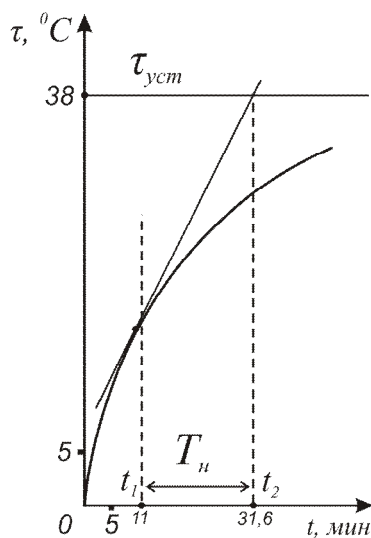


Рис 4.5 Определение постоянной времени охлаждения методом касательных

4. Метод трех точек. Определение постоянной времени нагрева этим методом не требует проведения вспомогательных построений для нахождения установившегося превышения температуры.

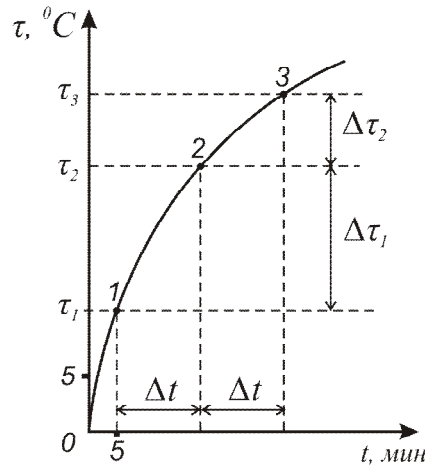


Рис 4.6 Определение постоянной времени охлаждения методом трех точек

Решая полученное выражение относительно постоянной времени, получим

$$T = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_3 - \tau_2}} = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\Delta \tau_1}{\Delta \tau_2}}, \quad (4.7)$$

Для определения постоянной времени охлаждения (T_o) достаточно по кривой охлаждения определить температуру в двух точках, тогда:

$$T_o = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\tau_1}{\tau_2}}, \quad (4.8)$$

где Δt – приращение времени между точками на опытной кривой охлаждения с температурами τ_1 и τ_2 .

Полученные данные в результате опыта используются для проверки и выбора мощности электродвигателя к рабочей машине.

Величина установившегося превышения $\tau_{уст}$ зависит от

количества тепла Q , выделяемого в двигателе и коэффициента теплоотдачи A .

$$\tau_{уст.} = \frac{Q}{A}, \quad (4.9)$$

Если пренебречь постоянными потерями, можно считать, что Q пропорционально квадрату нагрузки P . Следовательно:

$$\frac{\tau_{уст.н.}}{\tau_{уст.}} = \frac{P_n^2}{P^2}, \quad (4.10)$$

где: $\tau_{уст.н.}$ - установившееся номинальное значение превышения температуры при номинальной нагрузке, $С^0$;

$\tau_{уст}$ - установившееся превышение температуры при нагрузке (P , Вт), $С^0$;

P_n - номинальная мощность двигателя, Вт;

P - мощность нагрузки при опыте, Вт.

$$P = U \cdot I + P_{xx}, \quad (4.11)$$

где: U и I напряжение (B) и ток (A) нагрузки из таблицы 4.2;

P_{xx} - потери холостого хода агрегата генератор-двигатель, Вт.

Из формулы (4.10) следует:

$$P_n = P \cdot \sqrt{\frac{\tau_{уст.н.}}{\tau_{уст}}}, \quad (4.12)$$

Если температура окружающей среды Θ отличается от расчетной ($+40^0 C$), то допустимая нагрузка двигателя также отличается от паспортной. Для пересчета мощности при температуре окружающей среды отличной от расчетной можно воспользоваться формулой:

$$P_x = P_n \sqrt{1 + \frac{\Delta\tau}{\tau_{ном}} (1 + \alpha)} \quad , \quad (4.9)$$

где $\Delta\tau = \theta - \theta_0$ - разность между расчетной и фактической температурой окружающей среды;

P_x - мощность двигателя при температуре окружающей среды отличной от расчетной;

P_n - номинальная (паспортная) мощность двигателя;

$\tau_{ном}$ - номинальное превышение температуры двигателя для данного класса изоляции;

α - отношение постоянных потерь двигателя к переменным, для асинхронных двигателей 0,5...0,7.

Для изучения механических и скоростных характеристик ознакомимся с электрооборудованием лабораторного стенда. В его состав входят:

Таблица 4.1 Состав электрооборудования лабораторного стенда

№	Наименование	Усл. обоз. в схеме
1	Электромашинная нагрузка с асинхронным двигателем и двигателем постоянного тока	<i>M1</i> и <i>M2</i>
3	Амперметр	<i>PA1</i>
4	Вольтметр	<i>PV1</i>
5	Реостат возбуждения машины постоянного тока (<i>M2</i>)	<i>Rв</i>
6	Нагрузочные лампы	<i>HL</i>
7	Блок трехфазного питания	<i>C1</i>
8	Прибор для измерения температуры	<i>PS1</i>
9	Термопара установленная в пазов статора асинхронного электродвигателя (<i>M1</i>)	<i>BK1</i>

Опыт нагрева производится на асинхронном короткозамкнутом

двигателе ($M1$). Для измерения температуры в один из пазов статора установлена термопара ($BK1$), которая подключена к прибору по измерению температуры ($PS1$). Если между холодным и горячим сепями имеется разность температур, то в контуре возникает электродвижущая сила, пропорциональная разности температур. В данной установке ЭДС пропорциональна превышению температуры двигателя над температурой окружающей среды.

Нагрузка на валу исследуемого двигателя создается двигателем ($M2$) работающего в генераторном режиме с отдачей электрической энергии автономному потребителю (динамический тормозной режим), который в свою очередь нагружен сопротивлением ламп (HL). Для регулирования напряжения генератора последовательно с обмоткой возбуждения включено сопротивление R_g (рис 4.2).

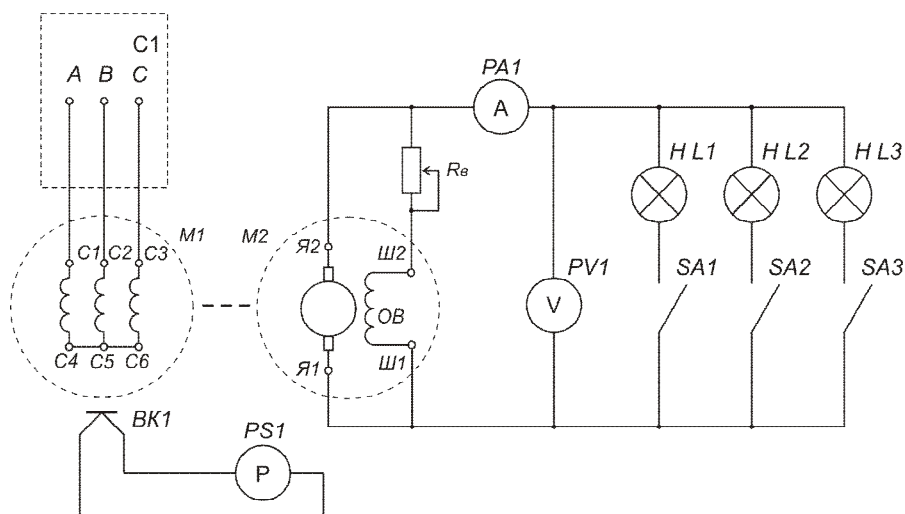


Рис 4.2 Электрическая схема установки для исследования нагрева электродвигателей

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с установкой для исследования нагрева электродвигателей (рис 4.2) и вычертить ее электрическую схему.

2. Собрать электрическую схему (рис 4.2) и включить установку в работу. Создать электродвигателю нагрузку путем включения ламп HL (величина нагрузки задается преподавателем и контролируется амперметром PA1) и снять данные по нагреву $\tau=f(t)$. Измерения производить в момент включения и каждые 3...5 минут в течении 30...40 минут. В процессе опыта следить, чтобы ток нагрузки и напряжение поддерживался постоянным. Опытные и расчетные данные записать в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 Опытные и расчетные данные

Время отсчета, мин.	Показания прибора, °С	Превышение температуры, °С	Напряжение нагрузки, В	Ток нагрузки, А	Мощность нагрузки, Вт
1	2	3	4	5	6

3. Построить кривую нагрева двигателя и определить установившееся превышение температуры двигателя.

4. Определить номинальную мощность электродвигателя (по формуле (4.12).

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

1. Принципиальную электрическую схему установки.
2. Паспортные данные приборов и оборудования.
3. Таблицу данных наблюдений и вычислений.
4. Расчетные формулы.

5. Экспериментальные и расчетные кривые нагрева.
6. Результаты расчетов по определению установившегося превышения температуры двигателя.
7. Результаты расчетов по определению постоянной времени нагрева двигателя тремя методами.
8. Результаты расчетов по определению номинальной мощности электродвигателя.
9. Заключение по работе.

Контрольные вопросы

1. Чем ограничивается допустимая нагрузка электродвигателя?
2. Какие классы изоляции применяются в электродвигателях?
3. Как классифицируют режимы работы электродвигателей?
4. Как определить установившуюся температуру двигателя?
5. Как определить постоянную времени нагрева двигателя?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 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.
2. Чиликин, М.Г. Общий курс электропривода [Текст] / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. — М. : Энергоиздат, 1981. — 576 с. : ил.
3. Электропривод и электрооборудование [Текст] : учебник для вузов / Коломиец А.П. ; Кондратьева Н.П. ; Владыкин И.Р. ; Юран С.И. - М: КолосС, 2006. - 328 с
4. Шичков Л.П. Электрический привод [Текст] : учебник для вузов / Л. П. Шичков. - М : КолосС, 2006. - 279 с.
5. Фролов Ю.М. Основы электрического привода. Краткий курс [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. - М : КолосС, 2007. - 252 с.
6. Кацман М.М. Лабораторные работы по электрическим машинам и электрическому приводу [Текст] : учеб. пособие для сред. проф. образования / М. М. Кацман. - 4-е изд., стереотип. - М : Академия, 2008. - 256 с.
7. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием [Текст] : учебник для вузов / Г. Г. Соколовский. - М : Академия, 2006. - 272 с.
8. Москаленко В.В. Электрический привод [Текст] : учебник для вузов / В. В. Москаленко. - М : Академия, 2007. - 368 с.
9. Онищенко Г.Б. Электрический привод [Текст] : учебник для вузов / Г. Б. Онищенко. - М : Академия, 2006. - 288 с.

10. Ильинский Н.Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение [Текст] : учеб. пособие для вузов / Н. Ф. Ильинский, В. В. Москаленко. - М : Академия, 2008. - 208 с.
11. Епифанов А.П. Основы электропривода [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. П. Епифанов. - СПб : Лань, 2008, 2009. - 192 с.
12. Онищенко Г.Б. Электрический привод [Текст] : учебник для вузов / Г. Б. Онищенко. - 2-е изд., стер. - М : Академия, 2008. - 288 с.
13. Епифанов, А.П. Электропривод в сельском хозяйстве [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. П. Епифанов, А. Г. Гущинский. - СПб : Лань, 2010. - 224 с.
14. Фролов, Ю.М. Сборник задач и примеров решений по электрическому приводу [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. - СПб : Лань, 2012. - 368 с.
15. Никитенко Г.В. Электропривод производственных механизмов [Электронный ресурс] : учеб. пособие для вузов / Г. В. Никитенко. - 2-е изд., испр. и доп. - Электрон. дан. - СПб : Лань, 2013. - 224 с. : ил. - (Учебник для вузов. Специальная литература). - Режим доступа: <http://e.lanbook.com>. - Загл. с экрана. - ISBN 978-5-8114-1468-0.
16. Никитенко, Г.В. Электропривод производственных механизмов [Текст] : учеб. пособие для вузов / Г. В. Никитенко. - 2-е изд., испр. и доп. - СПб : Лань, 2013. - 224 с.
17. Крылов, Ю.А. Энергосбережение и автоматизация производства в теплоэнергетическом хозяйстве города. Частотно-регулируемый электропривод [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. А. Крылов, А. С. Карандаев. - СПб : Лань, 2013. - 176 с.
18. Электропривод [Текст] : лаборатор. практикум для студентов направлений подготовки 110800.62 "Агроинженерия" и 140400.62

"Электроэнергетика и электротехника" очной и заочной формы обучения / Костромская ГСХА ; Васильков А.А. ; Бушуев И.В. - Каравеево : КГСХА, 2013. - 34 с.

19. Фролов, Ю.М. Проектирование электропривода промышленных механизмов [Электронный ресурс] : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению «Агроинженерия» / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. - Электрон. дан. - СПб : Лань, 2014. - 448 с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - Режим доступа: <http://e.lanbook.com>. - Загл. с экрана. - ISBN 978-5-8114-1571-7.

20. Электропривод [Электронный ресурс] : лаборатор. практикум для студентов направлений подготовки 110800.62 "Агроинженерия" и 140400.62 "Электроэнергетика и электротехника" очной и заочной формы обучения / Костромская ГСХА. Каф. электропривода и электротехнологии ; Васильков А.А.; Бушуев И.В. // Учебно-методические издания факультета электрификации и автоматизации сельского хозяйства. - КГСХА, 2013. - Режим доступа: <http://lib.ksaa.edu.ru/marcweb>, требуется регистрация. - Загл. с этикетки диска. - Электрон. дан. (1 файл).