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

Кафедра электропривода и электротехнологии

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Часть I

Лабораторный практикум
для студентов специальности 110302
«Электрификация и автоматизация сельского хозяйства»
очной формы обучения

2-е издание,
переработанное и дополненное

КОСТРОМА
КГСХА
2008

УДК 621.34
ББК 31.291
Э 45

Составитель: к.т.н., доцент, профессор кафедры электропривода и электротехнологии ФГОУ ВПО Костромская ГСХА *А.С. Симоненко*.

Рецензент: к.т.н., доцент кафедры электропривода и электротехнологии ФГОУ ВПО Костромская ГСХА *А.В. Рожнов*.

Рекомендовано к изданию методической комиссией факультета электрификации и автоматизации сельского хозяйства, протокол № 2 от 19 февраля 2008 года.

Э 45 **Электропривод. Ч. I** : лабораторный практикум для студентов специальности 110302 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» очной формы обучения / сост. А.С. Симоненко. — 2-е изд., перераб. и доп. — Кострома, 2008. — 60 с.

В издании содержатся программы выполнения лабораторных работ, краткое изложение теории по каждой работе, методика выполнения, таблицы для внесения результатов измерений и наблюдений, принципиальные схемы опытных установок, контрольные вопросы, содержание отчетов.

Лабораторный практикум предназначен для студентов специальности 110302 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» очной формы обучения.

УДК 621.34
ББК 31.291

© ФГОУ ВПО Костромская ГСХА, 2006
© ФГОУ ВПО Костромская ГСХА, 2008, перераб. и доп.
© А.С. Симоненко, составление, 2008
© Оформление, РИО КГСХА, 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 4

Лабораторная работа 1
Исследование механических и скоростных характеристик
двигателей постоянного тока с независимым возбуждением 5

Лабораторная работа 2
Исследование механических и скоростных характеристик
двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением 12

Лабораторная работа 3
Исследование механических и скоростных характеристик
трехфазных асинхронных электродвигателей с фазным ротором 20

Лабораторная работа 3 К
Исследование механических и скоростных характеристик
трехфазных асинхронных электродвигателей
с короткозамкнутым ротором 28

Лабораторная работа 4
Исследование пусковых свойств
трехфазных асинхронных электродвигателей
в однофазном режиме 36

Лабораторная работа 5
Определение моментов инерции в электроприводах
аналитическими и экспериментальными методами 42

Лабораторная работа 6
Исследование механических переходных процессов
в электроприводе с ДПТ независимого возбуждения 46

Лабораторная работа 7
Исследование механических переходных процессов
в электроприводе с асинхронным электродвигателем 51

Лабораторная работа 10
Исследование процесса нагрева и определение
номинальной мощности электродвигателя по нагреву 54

Приложение 61

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение лабораторных работ является одной из важнейших составных частей учебного процесса при формировании специалиста любого профиля. Лабораторная работа позволяет глубже воспринимать процессы, описываемые в теории, убеждаться на практике в достоверности теоретических закономерностей и относиться к ним с большим доверием. Выполнение лабораторных работ позволяет учащемуся получать первые навыки в проведении научных экспериментов, подбирать необходимое оборудование и измерительные приборы, оценивать их по назначению, диапазонам измерения, точности и погрешностям, составлять и собирать схемы опытных установок.

В процессе проведения опытов и обобщения их результатов удается получить наглядное подтверждение теории исследуемых процессов, учитывать и оценивать погрешности объективного и субъективного характера. При этом приобретаются первые навыки обобщения с будущими производственными установками, преодолеваются неуверенность и боязнь работы с ними. При выполнении лабораторных работ исследовательского характера очень важной составляющей является обработка и обобщение полученных в ходе работы материалов. Внимательное и тщательное проведение опытов, сознательное выполнение необходимых расчетов и графических построений, осмысление и обобщение полученных результатов, оформление отчетов с соблюдением требований стандартов и ЕСКД обеспечивают высокую эффективность познавательного процесса.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

Исследование механических и скоростных характеристик двигателей постоянного тока с независимым возбуждением

Цель работы: приобрести практические навыки в исследовании механических свойств электродвигателя с независимым (параллельным) возбуждением и построении механических и скоростных характеристик. Путем сравнения полученных данных с расчетными получить экспериментальное подтверждение теоретических зависимостей.

Программа работы

1. Ознакомиться с принципиальной электрической схемой установки и ее работой (приложения 1, 2).
2. Ознакомиться с применяемым в установке оборудованием и измерительными приборами, записать их паспортные данные.
3. Выполнить необходимые соединения в схеме.
4. Включить в работу агрегаты и осуществить регулировки, изменяющие режимы работы электродвигателей. Произвести наблюдения за работой испытуемого электродвигателя и показаниями измерительных приборов в различных режимах.
5. Снять данные для построения характеристик в двигательном режиме при $R_d = 0$ и $R_d = k\, r_я$.
6. Перевести электродвигатель в режим рекуперативного торможения и снять данные для построения характеристик при $R_d = 0$ и $R_d = k\, r_я$.
7. Перевести электродвигатель в режим торможения противовключением и снять данные для построения характеристики.
8. Перевести электродвигатель в режим динамического торможения и снять данные для построения двух характеристик.
9. По данным, полученным в пунктах 5-8, построить графики экспериментальных механических характеристик и отдельно скоростных характеристик электродвигателя в двигательном и тормозных режимах.
10. Вычислить значения угловой скорости по уравнениям скоростных и механических характеристик в двигательном и тормозных режимах и на графиках по п. 9 построить расчетные скоростные и механические характеристики. Сопоставить соответствующие экспериментальные и теоретические характеристики. Графики, полученные экспериментальными и расчетными методами строить различными типами линий.
11. Составить отчет по работе.
12. Составить заключение по работе.

Описание работы

Механические и скоростные характеристики электродвигателей имеют первостепенное значение при выборе и работе электроприводов. Благодаря свойству обратимости электрических машин, электродвигатели могут использоваться в качестве источников механической энергии, работая в двигательном режиме, и как источники электрической энергии — в режиме генератора. В этом случае электрическая энергия может отдаваться в сеть, на внешние сопротивления или на сопротивления, включенные между двигателем и сетью. В этом случае электродвигатель развивает тормозной момент, т.е. работает в одном из тормозных режимов.

Уравнение скоростной характеристики имеет следующий вид:

$$\omega = \frac{U - I(r_я + R_Д)}{c\Phi}, \qquad (1.1)$$

где ω — угловая скорость, 1/с;
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 — коэффициент пропорциональности;
Φ — магнитный поток, Вб.

Уравнение механической характеристики имеет вид

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - M\frac{r_я + R_Д}{c\Phi^2}, \qquad (1.2)$$

где M — момент, развиваемый двигателем, Нм.

С помощью уравнений (1.1) и (1.2) могут быть построены аналитические механические и скоростные характеристики в двигательном и тормозном режимах. Входящие в эти выражения величины предварительно задаются, вычисляются или берутся из опытов. Произведение $c\Phi$ определяется по данным паспорта электродвигателя

$$c\Phi = \frac{U_н - I_н r_я}{\omega_н},$$

где $r_я$ — сопротивление якоря, Ом, определяемое из выражения

$$r_я = 0{,}5\frac{(1-\eta_н)U_н}{I_н},$$

где $\eta_н$ — КПД двигателя при номинальной мощности.

Добавочное сопротивление измеряется прибором. Электромагнитный момент двигателя, Н·м, находится из выражения

$$M = c\ \Phi\ I_я.$$

Как следует из (1.1) и (1.2) скоростная и механическая характеристики двигателя параллельного (независимого) возбуждения во всех, кроме динамического, режимах представляют собою прямые линии, проходящие через точку идеального холостого хода ω_0. Ввиду прямолинейности этих характеристик, любая из них может быть построена по двум точкам, одной из которых является точка идеального холостого хода. Координаты второй точки определяются по данным опытов или расчетов.

Для исследования скоростных и механических характеристик применяется нагрузочный агрегат (универсальный стенд), работающий по принципу возвратной энергии. Электрическая схема агрегата приведена на рис. 1.1.

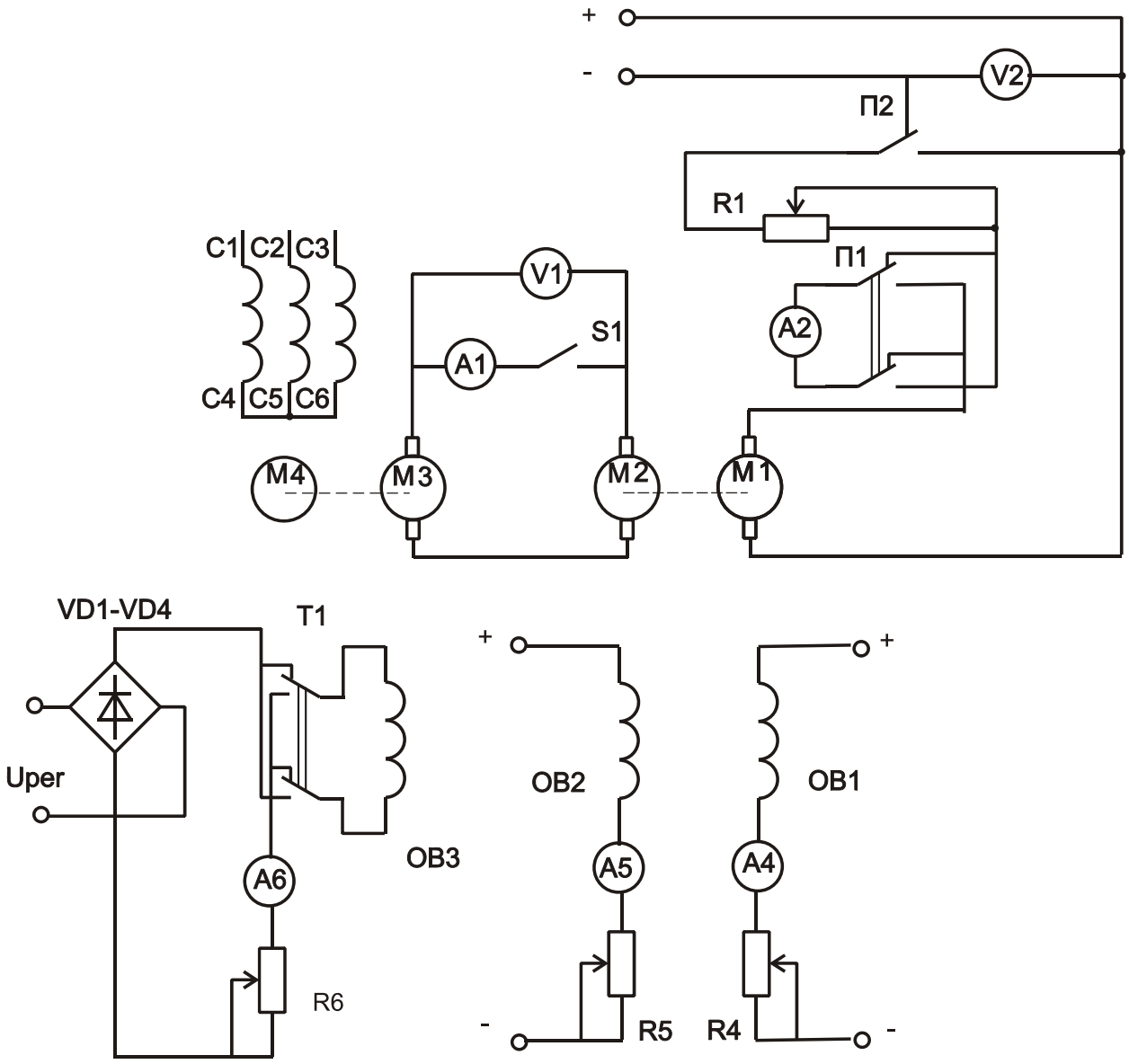

Рис. 1.1. Электрическая схема универсального стенда

Здесь вал исследуемого электродвигателя М1 соединен с валом нагрузочной машины постоянного тока М2 с независимым возбуждением. В качестве электрической нагрузки или источника питания для этой машины служит машина М3, якорь которой соединен с якорем машины М2. Машина М3 имеет независимое возбуждение и вращается с постоянной скоростью вспомогательным асинхронным двигателем М4. Режимы работы испытуемого двигателя задаются путем воздействия на токи возбуждения вспомогательных машин М2 или М3. Так, регулируя ток возбуждения машины М3, можно добиться того, что ток в цепи якорных обмоток М2 и М3 будет равен 0. В этом случае машины М2 и М3 работают вхолостую, а испытуемый двигатель М1 вращает на холостом ходу машину М2.

Для машины М1 это будет двигательный режим холостого тока. При уменьшении тока возбуждения машины М3 её ЭДС уменьшится, и она станет работать в режиме двигателя, вращая машину М4, которая переходит в режим асинхронного генератора, отдавая полученную от М3 энергию в сеть. В то же время М2 является генератором для М3 и механической нагрузкой для М1. Поэтому нагрузка на валу М1 возрастает. Напротив, если ток возбуждения М3 увеличить, её ЭДС станет больше ЭДС М2, которая в этом случае переходит в режим двигателя, вращая испытуемую машину М1.

Таким образом, изменяя в большей или меньшей степени ток возбуждения М3, можно соответственно изменять нагрузку на валу испытуемого двигателя. При этом двигатель М1 может работать как на естественной характеристике $(R_д = 0)$, так и на реостатных, если в цепь якоря введены добавочные сопротивления.

Производя измерения тока и скорости испытуемого двигателя, можно построить скоростные и механические характеристики для этого режима.

Путем изменения тока возбуждения машины М3 можно довести ток в якоре машины М1 до нуля, что соответствует ее работе в режиме идеального холостого хода. Дальнейшее увеличение тока возбуждения М3 приводит к возрастанию скорости М2 и переходу испытуемого двигателя в режим рекуперативного торможения. При этом машина М4 работает в двигательном режиме, М3 — в генераторном, М2 — в двигательном и М1 — в генераторном режиме.

При значительном уменьшении тока возбуждения М3 механическая нагрузка на валу М1 сильно возрастает, поэтому для ограничения в ней тока необходимо вводить добавочные сопротивления. Соответствующим подбором тока возбуждения в ОВ3 и добавочных сопротивлений в цепи якоря машины М1 последнюю переводят в режим противовключения. Для исследования динамического тормозного режима обмотку якоря машины

М1 отключают от сети и замыкают на добавочное сопротивление $R_д$. Тогда при включении в сеть асинхронного двигателя М4 машина М3 работает в режиме генератора, М2 — в режиме двигателя, а М1 работает в режиме генератора, отдавая электрическую энергию автономному потребителю — сопротивлению $R_д$. Путем изменения этого сопротивления можно получить характеристики с различной жесткостью.

Порядок выполнения работы

1. Пуск и остановка универсального стенда. Перед пуском в работу стенда необходимо поставить в исходное положение аппараты управления: добавочные сопротивления в цепи якоря М1 введены полностью, сопротивления в цепях обмоток возбуждения всех ДПТ полностью выведены, выключатель S1 разомкнут, переключатели П1, Т1, Т2 находятся в положении «+», переключатель П2 — в положении «Двиг» (см. рис. 1.1).

Подается питание в обмотки возбуждения, поочередно включаются в сеть двигатели М1 и М4, плавно и полностью выводятся добавочные сопротивления в якорной цепи машины М1. Путем изменения тока возбуждения в обмотке ОВ3 выравниваются ЭДС в якорных обмотках машин М2 и М3; при их равенстве вольтметр V1 показывает нуль. После этого включается выключатель S1 и запуск считается законченным.

Остановка агрегата осуществляется в обратном порядке: путем изменения тока возбуждения в ОВ3 довести ток в цепи якорей М2 и М3 до нуля (по амперметру А1), разомкнуть их выключателем S1 и отключить двигатели М1 и М4.

2. Испытания двигателя.

Двигательный режим. Путем изменения тока в обмотке ОВ3 установить ток в якоре М1, равный номинальному при $R_д = 0$. Затем, увеличивая ток в обмотке ОВ3, довести показания амперметра А2 до нуля, что будет соответствовать скорости идеального холостого хода машины М1. Значения тока и скорости записать в таблицу 1.1. Для получения искусственных реостатных характеристик в цепь якоря М1 ввести добавочные сопротивления и измерить скорость при тех же значениях тока якоря.

Рекуперативный режим. Регулируя ток в обмотке ОВ3, вывести машину М1 в режим идеального холостого хода. С увеличением скорости при $R_д = 0$ двигатель будет работать в рекуперативном тормозном режиме на естественных характеристиках. Если в цепь якоря машины М1 вводить добавочные сопротивления, получатся искусственные характеристики. Показания приборов для этого режима записать в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

Исследование двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Режим работы	Условия опыта	Экспериментальные и расчетные данные				
		I, А	n, 1/мин	$\omega_{оп}$, 1/с	$\omega_{расч}$, 1/с	M, Н·м
Двигательный	$R_д = 0$					
Двигательный	$R_д = k\, r_я$					
Рекуперативный	$R_д = 0$					
Рекуперативный	$R_д = k\, r_я$					
Динамический	$R_д = 0$					
Динамический	$R_д = k\, r_я$					
Противо включением	$R_д = k\, r_я$					

Примечание. Во избежание перегрузок в процессе проведения опытов, необходимо следить за показаниями приборов А1 и А2.

Режим противовключения. В цепь якоря машины М1 ввести значительное добавочное сопротивление и путем уменьшения тока в ОВ3 (вплоть до изменения его знака) добиться изменения направления вращения машины М1 при номинальном токе якоря. При обратном вращении вала машины М1 тумблер Т2 переключить в положение «–», показания тахометра записывать с отрицательным знаком. Показания приборов занести в таблицу 1.1.

Динамический тормозной режим. При отключенных от сети цепях стенда замкнуть контакты выключателя S1, переключатель П2 поставить в положение «Дин», а в цепь якоря машины М1 ввести добавочное сопротивление. В обмотки возбуждения ДПТ подать питание и включить двигатель М4. Путем регулирования тока в обмотке ОВ3 и добавочного сопротивления в цепи якоря М1 установить скорость машины и ток якоря близкими к номинальным. Затем, не меняя величину добавочного сопротивления, с помощью тока

в ОВ3 довести значения тока якоря М1 до нуля, фиксируя при этом изменения скорости испытуемой машины М1. Для получения других характеристик динамического торможения необходимо изменить величину добавочного сопротивления в цепи якоря М1. Данные измерений занести в таблицу 1.1.

Примечание. При снятии искусственных характеристик по пункту 2 измерить добавочные сопротивления в цепи якоря машины М1 методом амперметра и вольтметра и их значения записать в соответствующие графы таблицы 1.1. Для построения расчетных характеристик необходимо в формулы (1.1) и (1.2) подставлять соответствующие значения тока и момента, полученные из опытов, и вычислить значения скорости.

Содержание отчета

1. Принципиальная электрическая схема универсального стенда.
2. Таблица 1.1 с внесенными в нее данными измерений и вычислений по результатам опытов.
3. Основные расчетные формулы и 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 удовлетворять требованиям ЕСКД.
5. Заключение по работе.

Контрольные вопросы

1. Какому уравнению отвечает механическая характеристика ДПТ независимого возбуждения?
2. Что такое скорость идеального холостого хода?
3. От каких параметров зависит скорость идеального холостого хода?
4. Как перевести двигатель в режим торможения противовключения?
5. Как перевести двигатель в режим динамического торможения с независимым возбуждением?
6. Как перевести двигатель в режим динамического торможения с самовозбуждением?

Список рекомендуемых источников

1. Чиликин М.Г. Сандлер А.С. Общий курс электропривода. — М. : Энергоиздат, 1981. — С. 48-65.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

Исследование механических и скоростных характеристик двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением

Цель работы: приобрести практические навыки в исследовании механических свойств электродвигателя постоянного тока с последовательным возбуждением и построении механических и скоростных характеристик. Путем сопоставления полученных данных опытов с расчетными получить экспериментальное подтверждение теоретических зависимостей.

Программа работы

1. Ознакомиться с исследуемым двигателем, приборами и оборудованием. Записать их паспортные данные (приложения 1, 2).
2. Исследовать зависимость $c\Phi = f(I_в)$ и построить график этой зависимости.
3. Провести испытания двигателя в двигательном режиме при $R_д = 0$ (естественная характеристика) и при введенном добавочном сопротивлении (искусственная характеристика).
4. Провести испытания двигателя в режиме торможения противовключением.
5. Провести испытания двигателя в режиме динамического торможения при независимом возбуждении.
6. По данным испытаний в пунктах 3-5 построить графики скоростных и отдельно механических характеристик для двигательного и тормозных режимов.
7. Используя аналитические зависимости и график $c\ \Phi = f(I_в)$, построить расчетные скоростные и механические характеристики в двигательном и тормозных режимах.
8. Расчетные характеристики сопоставить с опытными и написать заключение.

Описание работы

Механические и скоростные характеристики электродвигателей имеют первостепенное значение при выборе и работе электроприводов.

Благодаря свойству обратимости, электродвигатели могут использоваться в качестве источников механической энергии, работая в двигательном режиме, и как источники электрической энергии с отдачей ее в сеть, на отдельно включенные сопротивления или на сопротивления, включенные между двигателем и сетью. В этом случае электродвигатель развивает тормозной момент, т.е. работает в одном из тормозных режимов.

Уравнение скоростной характеристики имеет вид

$$\omega = \frac{U - I(r_я + R_д)}{c\Phi}, \qquad (2.1)$$

где ω — угловая скорость, 1/с;
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 — коэффициент пропорциональности;
Φ — магнитный поток, Вб.

Уравнение механической характеристики имеет вид

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{M(r_я + R_д)}{c\Phi^2}, \qquad (2.2)$$

где М — момент, развиваемый двигателем, Нм.

С помощью уравнений (2.1) и (2.2) могут быть построены аналитические скоростные и механические характеристики в двигательном и тормозных режимах. Величины, входящие в выражения (2.1) и (2.2), предварительно вычисляются и берутся из опытов. Так, магнитный поток этого двигателя зависит от тока якоря, является его нелинейной функцией, поэтому для определения произведения $c\Phi$ необходимо снять опытным путем зависимость $c\Phi = f(I_я)$.

Сопротивление якоря, Ом, определяется из выражения

$$r_я = 0{,}5\,(1 - \eta_н)\frac{U_н}{I_н},$$

где $\eta_н$ — КПД двигателя при номинальной мощности.

Добавочное сопротивление измеряется прибором. Электромагнитный момент двигателя, Нм, находится из выражения:

$$M = c\Phi I_я.$$

Для исследования скоростных и механических характеристик применяется нагрузочный агрегат (универсальный стенд), работающий по принципу возвратной энергии. Принципиальная электрическая схема агрегата приведена на рис. 2.1.

Здесь вал исследуемого электродвигателя М1 соединен с валом нагрузочной машины постоянного тока М2 независимого возбуждения. В качестве электрической нагрузки или источника питания для этой машины служит машина М3, обмотка якоря которой соединена с обмоткой якоря машины М2. Машина М3 имеет независимое возбуждение и вращается с постоянной скоростью вспомогательным асинхронным двигателем М4.

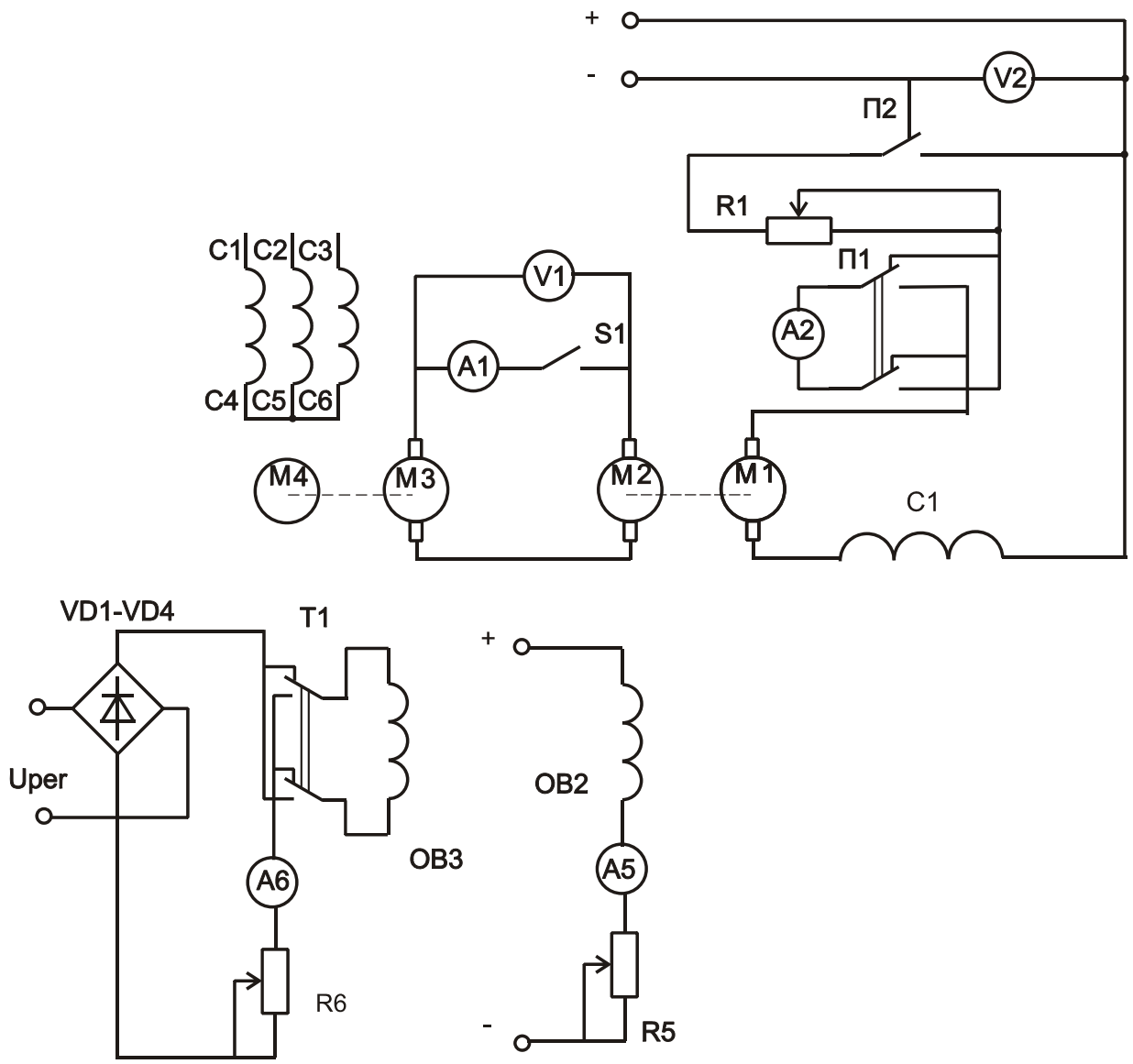

Рис. 2.1. Электрическая схема универсального стенда

Режим работы испытуемого двигателя задается путем воздействия на ток возбуждения машины М3.

Так, регулируя ток возбуждения машины М3, можно добиться того, что ток в цепи якорных обмоток машин М2 и М3 будет равен нулю и эти машины будут работать в режиме холостого хода. Для машины М1 это будет двигательный режим с малой нагрузкой. При снижении тока возбуждения машины М3 её ЭДС уменьшается, и она начинает работать в режиме двигателя, вращая машину М4, которая переходит в режим асинхронного генератора, отдавая полученную от М3 энергию в сеть. В то же время нагрузка на М2 увеличивается и механическая нагрузка на М1, поэтому нагрузка на валу М1 возрастает. Таким образом, изменяя в большей или меньшей степени ток возбуждения М3, можно соответственно изменять нагрузку на валу испытуемого двигателя. Двигатель М1 может работать как на естественной характеристике $R_д = 0$, также и на реостатных, если в цепь его якоря вводить добавочные сопротивления.

При значительном уменьшении тока возбуждения машины М3 механическая нагрузка на валу М1 сильно возрастает, поэтому для ограничения в ней тока необходимо вводить соответствующие добавочные сопротивления. Подбором тока возбуждения машины М3 и добавочных сопротивлений в цепи якоря машины М1 её переводят в режим противовключения. Для исследования динамического тормозного режима с независимым возбуждением обмотку якоря машины М1 отключают от сети и замыкают на добавочное сопротивление $R_д$, а обмотку возбуждения через добавочное сопротивление R_c — к источнику постоянного тока. При включении в сеть асинхронного двигателя М4 машина М3 работает в режиме генератора, М2 — в режиме двигателя, а М1 — в режиме генератора и отдает электрическую энергию автономному потребителю — сопротивлению $R_д$. Путем изменения этого сопротивления можно получить характеристики с различной жесткостью.

Рекуперативного тормозного режима этот электродвигатель не имеет.

ВНИМАНИЕ! Во избежание разноса при запуске двигателя М1, нельзя полностью выводить добавочное сопротивление в цепи якоря пока не будет создана нагрузка на его валу.

Порядок выполнения работы

1. Построение зависимости $c\Phi = f(I_в)$.

Для построения этой зависимости необходимо собрать схему по рис. 2.2 и ознакомиться с её работой при данном опыте.

Здесь последовательная обмотка возбуждения С1 испытуемой машины М1 подключается к источнику постоянного тока — якорю машины М3 через амперметр А1 и резистор Rc. Якорь машины М1 замыкается на вольтметр V1 и приводится во вращение машиной М2, которая подключается к сети постоянного тока.

Регулируя ток возбуждения в обмотке ОВ2, установить постоянную частоту вращения вала двигателя М1 и включить двигатель М4, приводящий во вращение якорь машины М3. Путем изменения тока возбуждения в ОВ3 и сопротивления Rc можно регулировать ток в обмотке возбуждения С1. При этом будут меняться магнитный поток и ЭДС якоря двигателя М1, т.к. $E = \omega c\Phi$.

Устанавливая целые числовые значения тока в обмотке С1 от $I_в = 1$ А до $I_в = 1{,}2\ I_н$, записать соответствующие значения ЭДС по вольтметру V2. Данные измерений занести в таблицу 2.1. Полученные данные позволяют построить зависимость $E = f(I_в)$, но, так как $c\Phi = E/\omega$, а угловая скорость известна, по этим же данным строится и зависимость $c\Phi = f(I_в)$.

Таблица 2.1

Построение зависимости $c\Phi = f(I_в)$

Экспериментальные и расчетные данные	*E*, В	*I*, А	*n*, об./мин	ω, 1/с	*cФ*, Вс
Выполнение по схеме (рис. 2.2)					

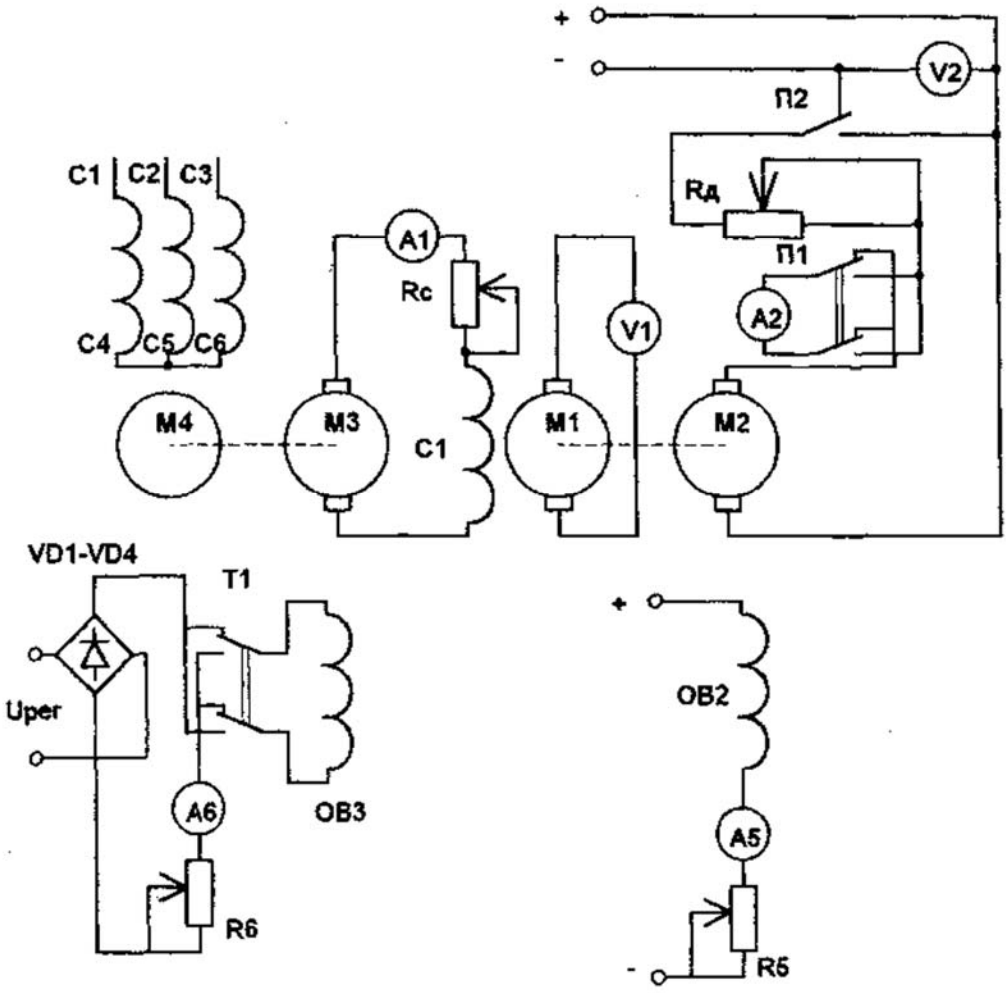

Рис. 2.2. Электрическая схема универсального стенда для получения зависимости с $\Phi(I_в)$

2. Исследование скоростных и механических характеристик в двигательном и тормозном режиме противовключения

Запуск универсального стенда (см. рис. 2.1)

В цепь якоря двигатель М1 ввести добавочное сопротивление, в цепи обмоток возбуждения ДПТ сопротивления вывести. Разомкнуть контакты выключателя S1. Подать питание в обмотки возбуждения ДПТ. Подать питание на статорную обмотку М4 и на якорь машины М1. Плавно выводить сопротивление $R_д$, не допуская чрезмерного увеличения скорости.

При скорости машины М1, близкой к номинальной, путем регулирования тока в ОВ3 выровнять ЭДС якорных обмоток М2 и М3 по вольтметру VI и включить выключатель S1. Вывести полностью сопротивление $R_д$.

Снятие скоростных и механических характеристик

Изменяя ток в обмотке ОВ3, провести испытания двигателя М1 на естественной характеристике в двигательном режиме. Для этого необходимо при $R_д = 0$ изменять нагрузку двигателя М1 и записать показания тахометра и амперметра А2 при 4-5 значениях тока якоря М1 в пределах от $0{,}4I_н$ до $1{,}2I_н$. Данные измерений занести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2

Исследование двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

Режим работы	Условия опыта	Экспериментальные и расчетные данные				
		I, А	n, 1/мин	$\omega_{оп}$, 1/с	$\omega_{расч}$, 1/с	M, Нм
Двигательный	$R_д = 0$					
Двигательный	$R_д = k\, r_я$					
Динамический	$R_д = 0$					
Динамический	$R_д = k\, r_я$					
Противо-включения	$R_д = k\, r_я$					

Для получения искусственных резисторных характеристик в цепь якоря М1 ввести добавочное сопротивление (величина задается преподавателем) и провести испытания в тех же пределах изменения тока якоря М1. Данные измерений занести в таблицу 2.2.

При испытаниях двигателя в режиме торможения противовключением необходимо в цепь якоря М1 ввести большее сопротивление (задается преподавателем). Изменением тока в обмотке ОВ3 добиться вначале уменьшения скорости машины М1 до нуля, затем изменения ее направления на противоположное. Снять показания тахометра и амперметра А2 при изменении тока якоря М1 в тех же пределах. Данные измерений занести в таблицу 2.2.

3. Исследование скоростных и механических характеристик динамического торможения

Собрать схему рис. 2.3 и ознакомиться с ее работой.

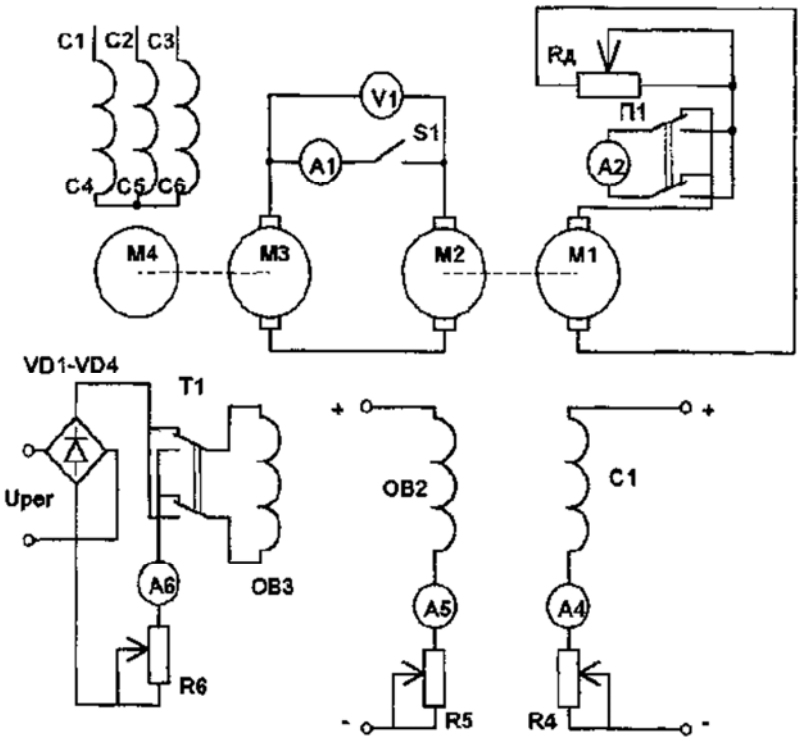

Рис. 2.3. Электрическая схема универсального стенда для динамического торможения

Переключатель П2 поставить в положение «ДИН». В цепь якоря М1 ввести сопротивление $R_д$. Замкнуть контакты выключателя S1. Установить величину тока в обмотке возбуждения С1 (задается преподавателем) и подать ток в обмотки ОВ2 и ОВ3. Запустить двигатель М4. Путем изменения тока в обмотке ОВ3 и сопротивления $R_д$ установить скорость двигателя М1 и ток по амперметру А2 близкими к номинальным значениям. Меняя в дальнейшем ток в ОВ3, получить ряд значений тока и скорости якоря М1. Для получения другой характеристики изменить величину сопротивления $R_д$ и провести испытания аналогичным образом. Данные измерений занести в таблицу 2.2.

Содержание отчета

1. Паспортные данные приборов, машин и аппаратов стенда.
2. Принципиальные электрические схемы экспериментальных установок.
3. Данные измерений, полученные в процессе проведения опытов.
4. Расчетные формулы и результаты расчетов к построению характеристик.
5. Графики механических характеристик, построенные по результатам испытаний и полученные по аналитическим зависимостям. Строятся на общем графике различными типами линий.
6. Графики скоростных характеристик, построенные по результатам испытаний и полученные по аналитическим зависимостям. Строятся на общем графике различными типами линий.
7. Выводы и заключения по работе.

Примечание. Все графические работы выполняются с соблюдением требований ЕСКД.

Контрольные вопросы

1. Чем объясняется гиперболический характер механической характеристики ДПТ последовательного возбуждения?
2. Почему ДПТ последовательного возбуждения не могут работать при холостом ходе и малых нагрузках?
3. Почему ДПТ последовательного возбуждения не имеют генераторного режима?
4. Как перевести ДПТ в динамический тормозной режим с самовозбуждением?
5. Как производится реверсирование ДПТ последовательного возбуждения?

Список рекомендуемых источников

1. Чиликин М.Г. Сандлер А.С. Общий курс электропривода. — М. : Энергоиздат, 1981. — С. 65-73.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Исследование механических и скоростных характеристик трехфазных асинхронных электродвигателей с фазным ротором

Цель работы: получить скоростные и механические характеристики трехфазных асинхронных электродвигателей опытным путем. Овладеть методикой эксперимента.

Программа работы

1. Ознакомиться с исследуемым двигателем, приборами и аппаратурой. Записать паспортные данные оборудования и приборов (приложение 3).
2. Рассчитать по паспортным и каталожным данным естественные и искусственные механические характеристики двигателя в режимах торможения противовключением и двигательном при изменении скорости в диапазоне от $-0{,}5\omega_0$ до $+\omega_0$. Добавочное сопротивление в цепи обмотки ротора для искусственной характеристики взять то, при котором снимается опытная.
3. Ознакомиться и собрать схемы универсального стенда для исследования характеристик двигателя.
4. Исследовать естественные и искусственные характеристики двигателя в режимах двигательном и тормозном, рекуперативном, динамическом и противовключением.
5. Данные, полученные в пункте 4, привести к номинальным напряжению и току.
6. Построить естественные и искусственные механические и скоростные характеристики, полученные аналитическим и опытным путем, на общем трафике линиями различных типов с соблюдением требований ЕСКД.
7. Оформить отчет.

Описание работы

Механическая характеристика асинхронного двигателя представляет собою сложную зависимость момента от скорости. Момент, развиваемый двигателем, может быть представлен как

$$M = c\Phi I_2 \cos\varphi_2,$$

где Φ — магнитный поток двигателя, $В_б$;
I_2 — ток в обмотке ротора, А;
φ_2 — угол между током и ЭДС в роторе.

При изменении скорости одновременно, но не в одинаковой степени изменяются ЭДС, ток и индуктивность обмотки ротора. В результате, при пуске двигателя его ток в несколько раз превышает номинальный, но $\cos\varphi_2$ находится в пределах 0,08-0,1, и поэтому пусковой момент сравни-

тельно невелик. В дальнейшем при увеличении скорости ЭДС и ток падают, а $\cos\varphi_2$ растет. В результате, увеличивается до определенного предела и момент. При скорости, близкой к синхронной, $\cos\varphi_2$ стремится к *единице*, а ток и момент — к *нулю*.

Уравнение механической характеристики (формула Клосса) имеет вид:

– уточненная:

$$M = \frac{2M_K\,(1+as_k)}{\frac{s}{s_k}+\frac{s_k}{s}+2as_k} \quad ; \tag{3.1}$$

– упрощенная:

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s}{s_k}+\frac{s_k}{s}}, \tag{3.2}$$

где M_k — максимальный момент двигателя;

a — коэффициент сопротивлений, отношение сопротивлений r_1 / r_{21};

s_k — критическое скольжение.

Величины, входящие в формулы (3.1) и (3.2) определяются по паспортным и каталожным данным.

$$M_k = \mu_k\, M_н,$$

где μ_k — кратность максимального момента;

$M_н$ — номинальный момент двигателя, определяется из выражения:

$$M_н = \frac{P_н}{\omega_н};$$

$\omega_н$ — номинальная угловая скорость:

$$\omega_н = \frac{\pi\, n_н}{30};$$

$n_н$ — номинальная частота вращения вала двигателя.

Отношение сопротивлений a в выражении (3.1) обычно принимают равным 1. Критическое скольжение определяют по следующим формулам:

– по уточненной формуле:

$$s_k = \frac{s_н\,(\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1 + 2s_н(\mu_k - 1)})}{1 - 2s_н(\mu_k - 1)},$$

– по упрощенной формуле:

$$s_k = s_н\,(\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1}),$$

где $s_н$ — номинальное скольжение:

$$s_н = \frac{n_0 - n_н}{n_0};$$

n_0 — синхронная частота вращения ротора.

По уравнению (3.2) могут быть построены как естественная, так и искусственные характеристики. Для построения искусственных характеристик в него необходимо подставлять критические скольжения, найденные при соответствующих добавочных сопротивлениях в роторе, как

$$s_{ku} = s_k \frac{r_2 + R_д}{r_2}. \qquad (3.3)$$

Исследование механических и скоростных характеристик опытным путем производится на универсальном стенде по методу возвратной энергии.

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

Для получения экспериментальной зависимости $M = f(\omega)$ или $M = f(s)$ машины М4, частота вращения ее вала измеряется тахометром, а вращающий момент — с помощью нагрузочной машины М3. При этом следует учитывать, что момент на валу испытуемого двигателя отличается от момента на валу машины М3 на величину механических потерь этих машин, и его определяют как

$$M = c\Phi\,(I_я \pm 0{,}5 I_{х.х.}), \qquad (3.4)$$

где $I_я$ — ток якоря машины М3 в двигательном и тормозных режимах машины М4;

$I_{х.х.}$ — ток якоря машины М3 при работе двигателя М4 вхолостую. Этот ток берется со знаком «+» для двигательного режима испытуемого двигателя.

В выражении (3.4) произведение $c\Phi$ определяется по паспортным данным машины М3 как

$$c\Phi = \frac{U_н - I_н r_я}{\omega_н},$$

Здесь $U_н$ и $I_н$ — соответственно номинальные напряжение и ток;

$r_я$ — сопротивление обмотки якоря, определяемое из выражения

$$r_я = 0{,}5\,(1 - \eta_н)\frac{U_н}{I_н},$$

где $\eta_н$ — номинальный КПД машины М3.

Поскольку испытания по снятию механических характеристик проводятся при пониженном напряжении, моменты и токи, полученные из опытов, необходимо привести к номинальному напряжению. Приведенные величины для режимов двигательного, рекуперативного и противовключением находятся из выражений:

– для моментов: $$M_{пр} = M_{оп}\left(\frac{U_{н}}{U_{оп}}\right)^{2}, \qquad (3.5)$$

– для токов: $$I_{пр} = I_{оп}\frac{U_{н}}{U_{оп}},$$

Выполнение работы

1. Снятие механических и скоростных характеристик в режимах двигательном и тормозных рекуперативном и противовключением

Запуск и остановка универсального стенда (рис. 3.1). Ввести добавочное сопротивление в цепь якоря машины М1 и испытуемого двигателя М4, а в цепях обмоток возбуждения ДПТ сопротивления вывести. Переключатель П2 поставить в положение «Двиг», а выключатель S1 выключить. Подать питание в обмотки возбуждения ДПТ и поочередно включить в сеть машины М1 и М4.

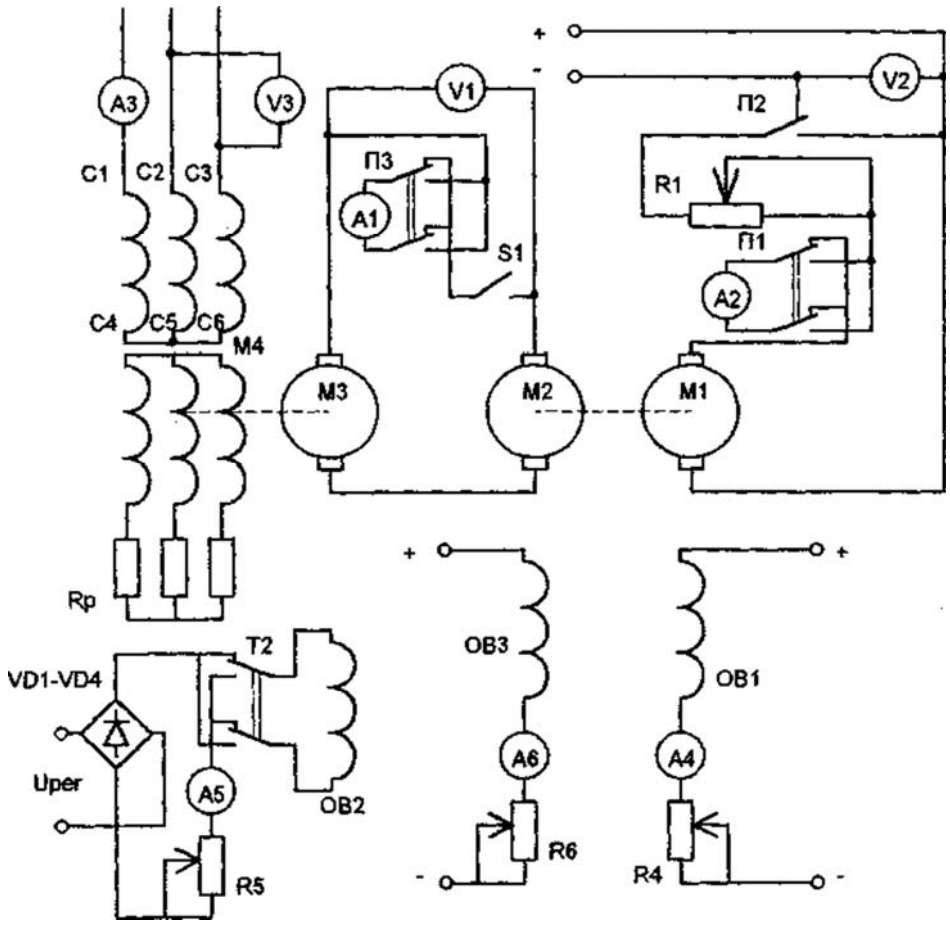

Рис. 3.1. Принципиальная схема лабораторного стенда

При этом необходимо помнить, что М4 подключается к пониженному напряжению. Регулируя ток в ОВ2, добиться равенства ЭДС в якорных обмотках М2 и М3 (вольтметр V1 показывает нуль) и включить выключатель S1.

Остановка агрегатов производится в обратной последовательности: путем регулирования тока в обмотке ОВ2 установить ток по амперметру А1 равным нулю, выключить S1, отключить машины М1 и М4 и ток в обмотках возбуждения ДПТ.

Снятие механических и скоростных характеристик. После запуска агрегатов универсального стенда путем регулирования тока в обмотке ОВ2 при неизменном токе в обмотке ОВ3 установить скорость вала испытуемого двигателя выше синхронной, что будет соответствовать рекуперативному тормозному режиму. Значения тока в обмотке статора, в якоре машины М3 и скорости вала двигателя М4 записать в таблицу 3.1. Далее, изменяя ток в ОВ2, уменьшить скорость вала машины М4 до синхронной, записав в таблицу 3.1 показания приборов для ряда точек, в том числе при синхронной скорости.

Таблица 3.1

Экспериментальные и расчетные данные

Режим работы	Условия опыта	$I_я$, *А*	$I_{ад}$, А	$I_{пр}$, А	$n_{оп}$, об./мин	$\omega_{оп}$, 1/с	$M_{оп}$, Н·м	$M_{ПР}$, Н·м
Двигательный	$R_д = 0$							
Двигательный	$R_д \neq 0$							
Рекуперативный	$R_д = 0$							
Рекуперативный	$R_д \neq 0$							
Динамический	$R_д = 0$							
Динамический	$R_д \neq 0$							
Противовключение	$R_д = 0$							
Противовключение	$R_д \neq 0$							

Продолжая изменять ток в ОВ2, произвести испытания при скоростях меньше синхронных (двигательный режим) за исключением скорости, равной нулю. Для построения достоверной механической характеристики в двигательном режиме необходимо снять показания для 8-10 точек.

Дальнейшее изменение тока в ОВ2 приводит к изменению направления вращения испытуемого двигателя, т.е. переводит двигатель в тормозной режим противовключением (режим тормозного пуска). Здесь необходимо получить данные для 3-4 точек до скорости примерно $0{,}5\omega_0$.

Для получения искусственных реостатных характеристик в цепь ротора машины М4 ввести добавочные сопротивления (по заданию преподавателя) и провести испытания в том же диапазоне скоростей.

3. По данным таблицы 3.1 вычислить значения моментов в двигательном и тормозных режимах по выражению (3.4). Входящий в формулу (3.4) ток холостого хода измерить амперметром А1 при скорости двигателя М4, близкой к синхронной, с отключенной от сети обмоткой статора.

4. Моменты, полученные в пункте 3, привести к номинальному напряжению согласно формуле (3.5).

2. Снятие механических характеристик в динамическом тормозном режиме

Запуск и остановка агрегатов универсального стенда (рис. 3.2). Обмотку статора испытуемого двигателя отключить от сети переменного тока и подключить к источнику постоянного тока, предусмотрев токоограничивающее сопротивление и амперметр. В обмотку статора испытуемого двигателя подать постоянный ток не более номинального по паспорту (или по заданию преподавателя). Переключатель П2 поставить в положение «Двиг», включить выключатель S1 и подать питание в обмотки возбуждения ДПТ. Запустить двигатель М1.

Для остановки агрегата необходимо: отключить двигатель М1, ток в обмотке статора двигателя М4, токи в обмотках возбуждения ДПТ и выключить S1

Снятие механических характеристик. После запуска двигателя М1 вывести сопротивления в цепи ротора испытуемого двигателя и постепенно увеличивать ток в ОВ2.

При этом начинает расти ЭДС машины М2 и момент, развиваемый двигателем М3. 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 4-5 точек. Затем увеличить скорость до синхронной и, постепенно снижая ее до критической, снять показания для 5-6 точек. Для получения искусственных реостатных характеристик в цепь ротора машины М4 ввести добавочные сопротивления и повторить испытания в том же порядке. Данные измерений записать в таблицу 3.1.

3. По данным таблицы 3.1 вычислить значения моментов в динамическом тормозном режиме согласно (3.4).

4. Полученные в пункте 3 моменты привести к эквивалентному номинальному току статора:

$$M_{пр} = M_{оп}\left(\frac{I_н}{k\, I_{оп}}\right)^2,$$

где k — коэффициент эквивалентного тока, зависящий от схемы соединения обмоток статора при динамическом торможении; в работе принять $k = 1$.

4.3. Расчет и построение аналитических механических характеристик

Аналитические естественные и искусственные механические характеристики следует построить для двигательного режима по уравнению (3.2) в диапазоне скоростей от $-0{,}5\omega_0$ до ω_0. Для построения аналитической характеристики целесообразно проводить вычисления на персональном компьютере в математической программе MathCAD, куда заносятся уравнение (3.2) и определяющие постоянные в виде:

$$M_к = \ ; \qquad s_k = \ ; \qquad s = \qquad ; \ M(s) := M = \frac{2\,M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}},$$

Для вычисления параметров искусственных реостатных характеристик необходимо в формулу (3.2) подставить значение s_k, найденное по выражению (3.3).

Данные вычислений занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

Расчетные данные

s											
M_e											
M_u											

Содержание отчета

1. Паспорта приборов, аппаратов и оборудования.
2. Принципиальные электрические схемы универсального стенда.
3. Таблицы данных измерений и вычислений.
4. Расчетные формулы и все необходимые расчеты.
5. Графики механических и скоростных характеристик, построенных по данным испытаний и расчетов (строятся на общем графике линиями различных типов).
6. Заключение о проделанной работе.

Примечание. Все графические работы выполняются с соблюдением требований и норм ЕСКД.

Контрольные вопросы

1. Почему электродвигатель называется синхронным?
2. Что означает синхронная скорость асинхронного двигателя?
3. Как перевести асинхронный двигатель с фазным ротором в тормозной режим противовключения?
4. Как изменяется максимальный момент двигателя при введении в цепь ротора добавочного активного сопротивления?
5. Как изменяется критическое скольжение двигателя при введении в цепь ротора добавочного активного сопротивления?

Список рекомендуемых источников

1. Олейник В.С. Практикум по автоматизированному электроприводу. — М. : Колос, 1978. — С. 38-45.
2. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. — М. : Энергоиздат, 1981. — С. 74-89.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3К

Исследование механических и скоростных характеристик трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором

Цель работы: изучить скоростные и механические характеристики трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Овладеть методикой эксперимента.

Программа работы

1. Ознакомиться с исследуемым двигателем, приборами и аппаратурой. Записать паспортные данные оборудования и приборов (приложение 2).
2. Рассчитать по паспортным и каталожным данным механические характеристики двигателя в режимах торможения противовключением и двигательном при изменении скорости в диапазоне от $-0{,}5\omega_0$ до $+\omega_0$.
3. Ознакомиться и собрать схемы для исследования характеристик двигателя.
4. Исследовать характеристики двигателя в режимах торможения противовключением, двигательном и тормозном рекуперативном.
5. Исследовать механические характеристики двигателя в динамическом тормозном режиме в диапазоне скорости от –0 до + ω_0.
6. Данные, полученные в пункте 4, привести к номинальному напряжению.
7. Данные, полученные в пункте 5, привести к номинальному току статора.
8. Построить механические и скоростные характеристики, полученные аналитическим и опытным путем, на общем графике.
9. Оформить отчет.

Описание работы

Механическая характеристика асинхронного двигателя представляет собою сложную зависимость момента от скорости. Момент, развиваемый двигателем, может быть представлен как

$$M = c\,\Phi\,I_2\cos\varphi_2,$$

где Φ — магнитный поток двигателя;
I_2 — ток в обмотке ротора;
φ_2 — угол между током и ЭДС в роторе.

При изменении скорости одновременно, но не в одинаковой степени изменяются ЭДС, ток и индуктивность обмотки ротора. В результате, при пуске двигателя его ток в несколько раз превышает номинальный, а $\cos\varphi_2$ находится в пределах 0,08-0,1, поэтому и пусковой момент сравнительно невелик.

В дальнейшем, при увеличении скорости ЭДС и ток падают, а cos φ_2 растет. В результате, увеличивается до определенного предела и момент. При скорости, близкой к синхронной, ток и момент стремятся к нулю.

Уравнение механической характеристики имеет вид

$$M = \frac{2\,M_k\,(1 - a\,s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\,a\,s_k}, \qquad (3к.1)$$

где M_k — максимальный момент двигателя;

a — отношение сопротивлений $г_1 / г`_2$;

s_k — критическое скольжение.

Эти величины определяются по паспортным и каталожным данным.

$$M_k = \mu_k\,M_н,$$

где μ_k — кратность максимального момента;

$M_н$ — номинальный момент двигателя, определяется из выражения:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_н},$$

в свою очередь $\omega_н$ — номинальная угловая скорость:

$$\omega_н = \frac{\pi\,n_н}{30},$$

где $n_н$ — номинальная частота вращения вала двигателя, 1/мин.

Отношение сопротивлений а обычно принимают равным 1.

Критическое скольжение определяют по формуле

$$s_k = \frac{s_н\,(\mu_k + (\mu_k^2 - 1 + 2\,s_н\,(\mu_k - 1))^{\frac{1}{2}})}{1 - 2\,s_н\,(\mu_k - 1)},$$

где $s_н$ — номинальное скольжение:

$$s_н = \frac{n_0 - n_н}{n_0},$$

n_0 — синхронная частота вращения ротора.

Исследование механических и скоростных характеристик опытным путем производится на универсальном стенде по методу возвратной энергии.

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.

Для получения зависимости $M = f(\omega)$ или $M = f(s)$ необходимо скорость измерять с помощью тахометра, а момент асинхронного двигателя измеряется с помощью нагрузочной машины М3. Следует учитывать при этом, что момент на валу испытуемого двигателя отличается от момента на валу машины М3 на величину механических потерь этих машин. Момент на валу испытуемого двигателя определится как:

$$M = c\,\Phi\,(I_{я} \pm 0{,}5\,I_{х.х.}), \qquad (3к.2)$$

где $I_{х.х.}$ — ток холостого хода якоря машины М3 при работе двигателя М4 вхолостую. Этот ток берется со знаком «+» при двигательном режиме испытуемого двигателя.

В выражении (3к.2) произведение $c\Phi$ определяется по паспортным данным машины М3 как

$$c\,\Phi = \frac{U_{Н} - I_{н}\,r_{я}}{\omega_{н}},$$

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

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

где $\eta_{н}$ — номинальный КПД машины М3.

Поскольку испытания по снятию механических и скоростных характеристик проводятся при пониженном напряжении, моменты и токи, полученные из опытов, необходимо привести к номинальному напряжению. Приведенные величины находятся из выражений:

– для моментов:

$$M_{пр} = M_{оп}\left(\frac{U_{н}}{U_{п}}\right)^{2}; \qquad (3к.3)$$

– для токов:

$$I_{пр} = I_{оп}\,\frac{U_{н}}{U_{оп}}. \qquad (3к.4)$$

Порядок выполнения работы

4.1. Снятие механических и скоростных характеристик в режимах торможения противовключением, двигательном и тормозном рекуперативном

1. Запуск и остановка универсального стенда (см. рис. 3к.1).

В цепь якоря двигателя М1 ввести добавочное сопротивление r_d, а в цепях обмоток возбуждения ДПТ сопротивления вывести. Переключатель П2 поставить в положение «Двиг», а выключатель S1 выключить. Подать

питание в обмотки возбуждения ДПТ и поочередно включить в сеть машины М1 и М4. При этом необходимо помнить, что М4 подключается к пониженному напряжению. Регулируя ток в ОВ2, добиться равенства ЭДС в якорных обмотках М2 и М3 (вольтметр VI показывает нуль) и включить выключатель S1.

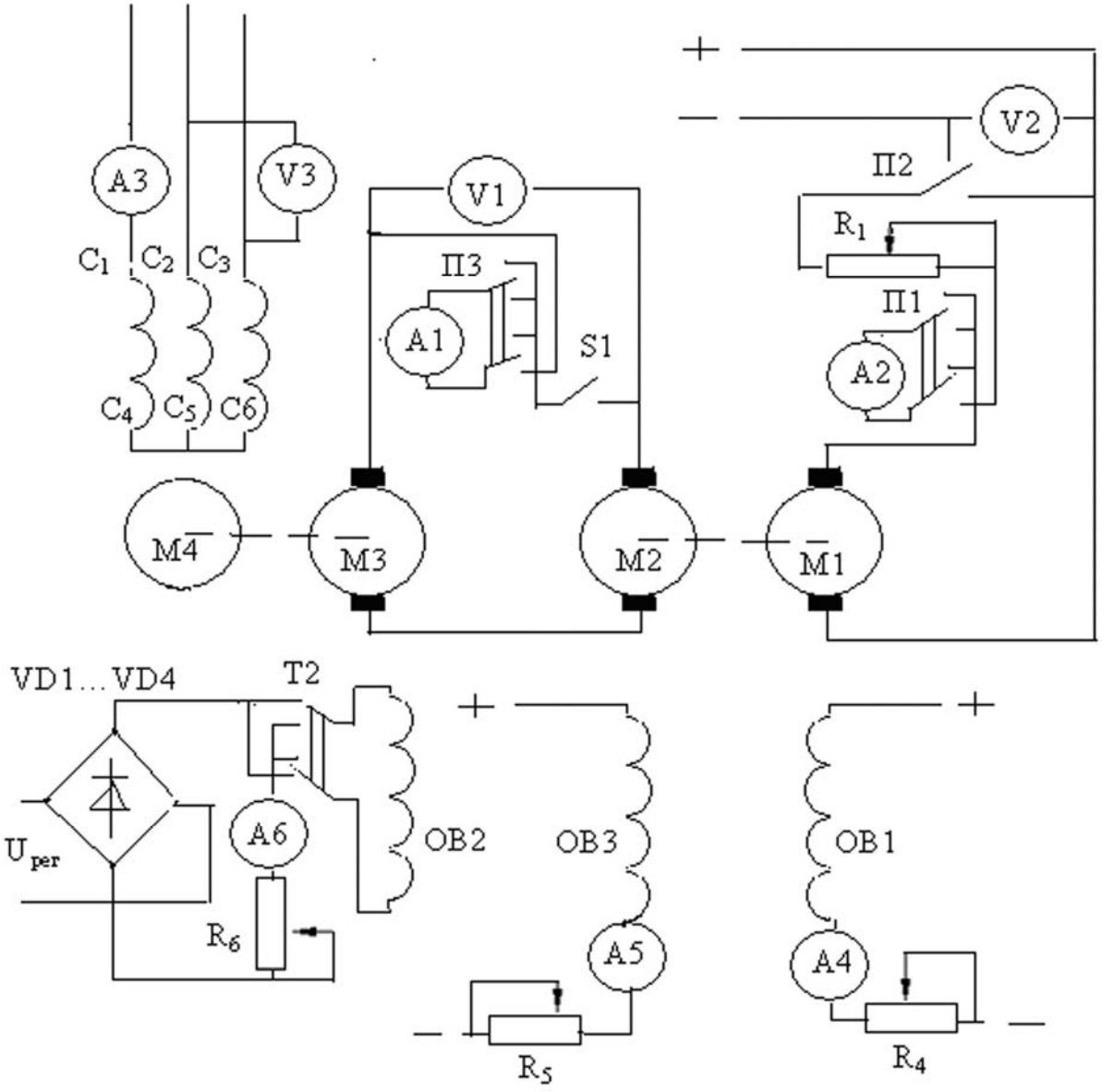

Рис. 3.1к. Принципиальная электрическая схема для исследования двигательных режимов

Остановка агрегатов производится в обратной последовательности. Путем регулирования тока в обмотке ОВ2 установить ток по амперметру А1 равным нулю, выключить S1, отключить машины М1 и М4 и ток в обмотках возбуждения ДПТ.

2. Снятие механических и скоростных характеристик (рис. 3.2к).

После запуска агрегатов универсального стенда путем регулирования тока в обмотке ОВ2 при неизменном токе в обмотке ОВ3 установить скорость вала испытуемого двигателя выше синхронной, что будет соответ-

ствовать рекуперативному тормозному режиму. Значения тока в обмотке статора, в якоре машины М3 и скорости вала двигателя М4 записать в таблицу 5.1. Далее, изменяя ток в ОВ2, уменьшить скорость вала машины М4 до синхронной, записав в таблицу 5.1 показания приборов для ряда точек, в том числе при синхронной скорости.

Продолжая изменять ток в ОВ2, произвести испытания при скоростях меньше синхронных в двигательном режиме за исключением скорости, равной нулю. Для построения достоверной механической характеристики в двигательном режиме необходимо снять показания для 8-10 точек.

Дальнейшее изменение тока в ОВ2 приводит к изменению направления вращения испытуемого двигателя, т.е. переводит двигатель в тормозной режим противовключением (режим тормозного спуска). Здесь необходимо произвести измерения для 3-4 точек до скорости $\approx 0{,}3\omega_0$ и данные записать в таблицу 3.1к.

Таблица 3.1к

Экспериментальные и расчетные данные

Режим работы	Условия опыта	$I_я$, А	$I_{ад}$, А	$I_{пр}$, А	$n_{оп}$, об/мин	$\omega_{оп}$, 1/с	$M_{оп}$, Н·м	$M_{пр}$, Н·м
Двигательный	$R_d = 0$							
Рекуперативный	$R_d = 0$							
Динамический	$R_d = 0$							
Противо включения	$R_d = 0$							

3. По данным таблицы 3.1к вычислить значения моментов в двигательном и тормозных режимах по формуле (3к.2). Для измерения тока холостого тока $I_{х.х.}$ довести скорость испытуемого двигателя до величины, близкой к синхронной и отключить его от сети трехфазного тока.

4. Моменты, полученные в пункте 3, привести к номинальному напряжению согласно формуле (3к.3).

4.2. Снятие механических характеристик динамического тормозного режима

Запуск и остановка агрегатов универсального стенда (рис. 3к.2).

Обмотки статора испытуемого двигателя отключить от сети переменного тока и подключить к источнику постоянного тока, предусмотрев токоограничивающее сопротивление и амперметр; установить в

них постоянный ток не более номинального по паспорту. Переключатель П2 поставить в положение «Двиг», включить выключатель S1 и подать питание в обмотки возбуждения ДПТ, после чего запустить двигатель М1.

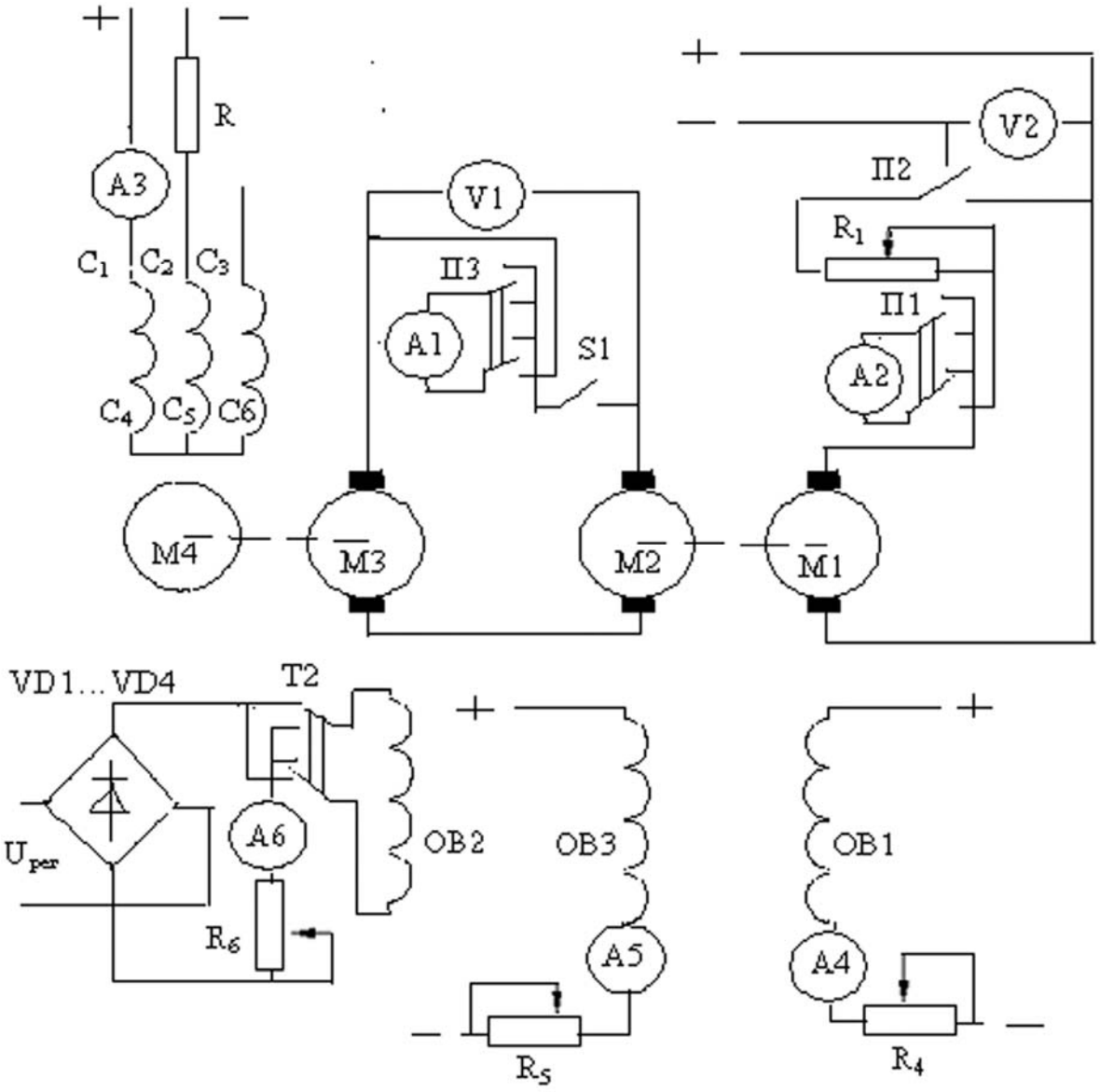

Рис. 3k.2. Принципиальная схема лабораторного стенда в режиме динамического торможения

Для остановки агрегата необходимо отключить от сети двигатель М1, ток в обмотке статора двигателя М4, токи в обмотках возбуждения ДПТ и выключить S1.

Снятие механических характеристик. После запуска двигателя М1 постепенно увеличивать ток в ОВ2; при этом начинает расти ЭДС машины М2 и момент, развиваемый двигателем М3. Вначале, по мере увеличения момента, скорость будет нарастать медленно, и ее измере-

ние 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 4-5 точек. Затем увеличить скорость до синхронной и, постепенно снижая ее до критической, снять показания для 5-6 точек. Данные измерений записать в таблицу 3к.1.

3. По данным таблицы 3к.1. вычислить значения моментов в динамическом тормозном режиме согласно формуле (3к.2).

4. Полученные в пункте 3 моменты привести к эквивалентному номинальному току статора в соответствии с формулой (3к.4):

$$M_{пр} = M_{оп}\left(\frac{I_{н}}{к\, I_{оп}}\right)^2,$$

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

4.3. Расчет и построение аналитических механических характеристик.

Аналитические механические характеристики следует построить для режимов тормозного противовключением и двигательного в диапазоне скоростей от $–0{,}5\omega_0$ до $+\ \omega_0$. Эти характеристики строятся по уравнению (3к.1) с корректировкой для получения действительного пускового момента:

$$M = \frac{2\, M_k\,(1+e)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\,e}, \qquad (3к.5)$$

где e — коэффициент корректирования механической характеристики.

Вычисления для построения аналитической характеристики целесообразно проводить на персональном компьютере в программе MathCad, куда заносятся уравнение (3к.5) и определяющие постоянные:

$$e = \frac{\left(\frac{1}{s_k} + s_k - 2\,\frac{M_k}{M_0}\right)}{2\left(\frac{M_k}{M_0} - 1\right)},$$

здесь M_0 — пусковой момент двигателя.

Примечание. В связи с введением в формулу Клосса (3к.5) корректировки, она пригодна к использованию только при положительных значениях скольжений.

Данные вычислений занести в таблицу 3к.2.

Таблица 3к.2

S										
M										

Содержание отчета

1. Паспорта приборов, аппаратов и оборудования.
2. Принципиальные электрические схемы универсального стенда, вычерченные с соблюдением требований ЕСКД.
3. Таблицы данных измерений и вычислений.
4. Расчетные формулы и все необходимые расчеты.
5. Графики механических и скоростных характеристик, построенных по данным испытаний и расчетов (строятся на общем графике линиями различных типов и выполняются с соблюдением требований ЕСКД).
6. Заключение о проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Что называется механической характеристикой электродвигателя?
2. Что называется скоростной характеристикой двигателя?
3. В чем состоит принципиальное отличие тормозного режима электродвигателя от двигательного?
4. В каких тормозных режимах может работать асинхронный двигатель?
5. Что такое пусковой ток двигателя?
6. Почему действительный пусковой момент короткозамкнутого двигателя не равен теоретическому?
7. Что такое кратность пускового момента?
8. Что такое кратность максимального момента?

Список рекомендуемых источников

1. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. — М. : Энергоиздат, 1981. — С. 74-89.
2. Олейник В.С. Практикум по автоматизированному электроприводу. — М. : Колос, 1978. — С. 38-45.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

Исследование пусковых свойств трехфазных асинхронных электродвигателей в однофазном режиме

Цель работы: исследовать пусковые особенности 3-фазных электродвигателей в однофазном режиме, а также влияние схем соединения и параметров обмоток на пусковые свойства.

Программа работы

1. Ознакомиться с оборудованием и приборами, необходимыми для выполнения работы и записать их паспортные данные (приложение 4).
2. Используя паспортные и каталожные данные, построить механическую характеристику двигателя в трехфазном режиме по 4-м точкам.
3. Собрать схему для включения двигателя в трехфазном режиме и измерить пусковой момент.
4. Собрать схему для измерения фазного пускового тока двигателя.
5. Рассчитать добавочное активное сопротивление в цепи пусковой обмотки для однофазного режима с резисторным пуском, собрать схему, включить двигатель и измерить пусковой момент.
6. Рассчитать пусковую и рабочую емкости в цепи пусковой обмотки для однофазного режима с конденсаторным пуском, собрать схему, включить двигатель и измерить пусковые моменты при этих емкостях.
7. Рассчитать и построить векторные диаграммы для однофазных режимов по пунктам 5 и 6, проанализировать зависимость величины пусковых моментов от схем включения и параметров пусковых обмоток.
8. Произвести пуск двигателя в однофазном режиме по схемам п.п. 5, 6 и осуществить реверсирование.

Описание работы

Отличительной особенностью однофазного двигателя без специальных средств для пуска (пусковой обмотки) является отсутствие пускового момента, что делает его малопригодным для применения. Пусковая обмотка призвана обеспечить пусковой момент двигателя. Для этого она должна быть расположена на статоре под углом 90 электрических градусов относительно рабочей обмотки, включаться параллельно ей, а между токами в этих обмотках должен быть обеспечен сдвиг по фазе. Для сдвига по фазе токов последовательно в цепь пусковой обмотки включается активное или емкостное сопротивление. В соответствии с этим различают двигатели с резисторным или емкостным пуском.

При отсутствии специальных однофазных двигателей можно использовать трехфазные в однофазном режиме. При этом следует иметь в виду, что использование трехфазных двигателей мощностью более одного киловатта в однофазном режиме нецелесообразно.

Схемы соединения обмоток статора в однофазном режиме выбирают в зависимости от напряжения однофазной сети и номинального напряжения обмоток двигателя, определяемого по его паспорту. При выборе схемы необходимо соблюдать требование, чтобы напряжение, приходящееся на каждую фазу в однофазном режиме, было близким к номинальному паспортному, но не превышало его. При напряжении сети, равном номинальному фазному напряжению двигателя, наиболее приемлемыми являются схемы, представленные на рис. 4, *a*, *b* и *c*.

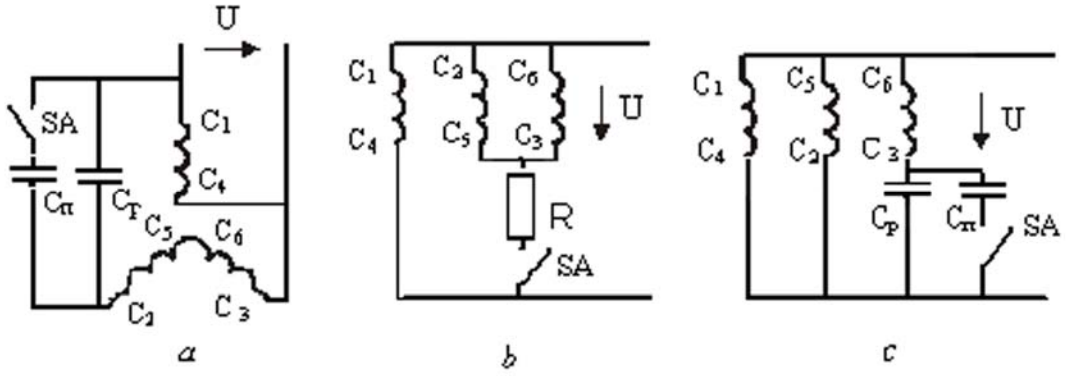

Рис. 4.1. Схемы включения 3-фазных двигателей для однофазных режимов

Для расчета параметров пусковых обмоток в этих схемах необходимо вначале определить параметры одной фазы в режиме пуска как

$$z_{ФК} = \frac{U_{ФН}}{I_{ФК}},$$

где $z_{ФК}$ — полное сопротивление короткого замыкания фазы обмотки статора;

$U_{Фн}$ — номинальное фазное напряжение обмотки статора;

$I_{ФК}$ — фазный ток короткого замыкания обмотки статора.

Ток короткого замыкания можно определить экспериментальным или расчетным методами. Для определения экспериментальным методом фазу двигателя подключают к номинальному переменному напряжению и измеряют амперметром величину тока. Расчетным методом его определяют как

$$I_{фк} = k_i \, I_{фн},$$

где $I_{ФН}$ — фазный номинальный ток;

k_i — кратность пускового тока по каталогу.

Резисторные схемы обеспечивают максимальный пусковой момент при введении в цепь пусковой обмотки активного сопротивления, равного по величине модулю полного сопротивления короткого замыкания пусковой обмотки, (рис. 4.1, *b*):

$$R_п = z_{пк}.$$

Полное сопротивление цепи пусковой обмотки для схемы (рис. 4.1, *b*) находится как

$$z_{пк} = 0,5\, z_{фк}\,.$$

Параметры векторной диаграммы для схемы (рис. 4.1, *b*)

Ток в рабочей обмотке, определяемый по закону Ома:

$$I_p = \frac{U}{z_p},$$

где U — напряжение, подведенное к двигателю;

Z_p — полное сопротивление цепи рабочей обмотки.

Активное сопротивление фазы измеряется прибором. Индуктивное сопротивление при коротком замыкании определяется по формуле

$$x_{ФК} = \sqrt{z_{ФК}^2 - r_1^2}\,,$$

здесь r_1 — активное сопротивление фазы, измеряется методом амперметра и вольтметра.

Угол сдвига между током рабочей обмотки и напряжением при пуске определяется как

$$\varphi_p = \arcsin\frac{x_{фк}}{z_{фк}}.$$

Ток в пусковой обмотке:

$$I_n = \frac{U}{z_n},$$

где z_n — полное сопротивление цепи пусковой обмотки

$$z_n = \sqrt{(0,5r_1 + R_n)^2 + (0,5x_{фк})^2}\,,$$

Угол сдвига между током и напряжением в этой цепи:

$$\varphi_n = \arcsin\frac{x_n}{z_n} = \arcsin\frac{0,5x_{фк}}{z_n}\,,$$

Угол сдвига между токами в пусковой и рабочей обмотках определяется разностью:

$$\theta = \varphi_p - \varphi_n\,. \qquad (4.1)$$

При конденсаторном пуске (рис. 4.1, *a* и *c*) требуемая емкость вычисляется из соотношения:

$$x_c = z_n\,,$$

где x_c — емкостное сопротивление в цепи пусковой обмотки;

z_n — модуль полного сопротивления пусковой обмотки.

Искомая емкость C, мкФ, определится по известному соотношению:

$$C = \frac{10^6}{\omega U},$$

здесь ω — угловая частота, при стандартной частоте тока $\omega = 314$ с$^{-1}$;
U — напряжение на пусковой обмотке, В.

Полное сопротивление цепи пусковой обмотки при конденсаторном пуске определяется по формуле

$$z_n = \sqrt{r_n^2 + \left(x_L - x_c\right)^2},$$

где r_n — активное сопротивление пусковой обмотки;
x_L — индуктивное сопротивление пусковой обмотки;
x_c — емкостное сопротивление цепи пусковой обмотки.

Угол сдвига по фазе между током в цепи пусковой обмотки и напряжением определяется из выражения

$$\varphi_n = \arcsin\frac{x_L - x_c}{z_n}. \qquad (4.2)$$

Угол сдвига по фазе θ между токами в пусковой и рабочей обмотках определяется по выражению (4.1) с учетом того, что, согласно формуле (4.2), угол φ_n может быть положительным и отрицательным.

Номинальная мощность двигателя в однофазном режиме не превышает 0,55-0,6 номинальной мощности трехфазного режима. Для реверсирования однофазного двигателя необходимо поменять местами концы пусковой или рабочей обмотки. Максимальные кратности пускового момента для схем (рис. 4.1, *а*) — $\mu_{1\phi}$ = 0,3÷0,4; (рис. 4.1, *b*) — $\mu_{1\phi}$ = 1,3; (рис. 4.1, *c*) — $\mu_{1\phi}$ = 2,5.

Порядок выполнения работы

При выполнении работы необходимо выбрать для имеющихся напряжений сети рациональные схемы однофазного включения трехфазного двигателя с реостатным и конденсаторным пуском, определить параметры фазных обмоток статора, рассчитать соответствующие пусковое активное сопротивление и емкость для выбранных схем, осуществить включение двигателя в работу и измерить пусковые моменты.

1. Измерение пускового момента в трехфазном режиме

Собрать схему для трехфазного включения двигателя, включить его в сеть с номинальным напряжением и добиться такого направления враще-

ния, при котором пружина динамометра будет работать на растяжение. Отключить двигатель и установить на его валу рычаг для измерения вращающего момента. Включить двигатель и с помощью динамометра измерить усилие на рычаге. Показание динамометра записать в таблицу 4.1.

Примечание. Во избежание перегрева обмоток двигателя, включение его при измерении пускового момента должно быть кратковременным. Должны быть предусмотрены меры, исключающие возможность повреждения динамометра.

Таблица 4.1

Данные измерений

Режим	Сила, Н	Плечо, м	Момент, Нм
3-х фазный		0,372	
1-фазный с $R_п$		0,372	
1-фазный с $C_р$		0,372	
1-фазный с $C_п$		0,372	

2. Измерение пускового момента в однофазном режиме с реостатным пуском

Рассчитать величину пускового сопротивления резистора. Собрать схему и путем пробного включения добиться нужного направления вращения вала двигателя. Установить рычаг на валу двигателя и после его включения измерить усилие на рычаге. Показание динамометра записать в таблицу 4.1.

3. Измерение пускового момента в однофазном режиме с конденсаторным пуском

Рассчитать рабочую и пусковую емкости конденсаторов, собрать схему и, включив двигатель, добиться нужного направления вращения. Установить рычаг на валу и после включения двигателя измерить усилия на рычаге при рабочей и пусковой емкостях. Показания динамометра записать в таблицу 4.1.

4. Произвести реверсирование двигателя в однофазном режиме.

5. Используя данные, полученные в пунктах 2 и 3, а также параметры обмоток статора двигателя, построить векторные диаграммы для напряжений и пусковых токов в однофазном режиме с реостатным и конденсаторным пуском при пусковой и рабочей емкостях.

6. Вычислить величину пусковых моментов по данным таблицы 4.1 и сопоставить их с векторными диаграммами.

7. Сделать выводы и заключение.

Содержание отчета

1. Паспортные данные приборов и оборудования.
2. Схема включения двигателя в сеть трехфазного тока.
3. Расчеты для построения механической характеристики двигателя в трехфазном режиме.
4. Расчет параметров обмоток статора.
5. Схемы включения трехфазного двигателя в однофазном режиме с реостатным и конденсаторным пуском и их обоснование.
6. Расчет пускового сопротивления для реостатного пуска.
7. Расчет рабочей и пусковой емкости для конденсаторного пуска.
8. Данные измерений при трехфазном и однофазном включении двигателя.
9. Расчеты параметров к построению векторных диаграмм.
10. График механической характеристики двигателя в трехфазном режиме с нанесением пусковых моментов однофазного режима.
11. Векторные диаграммы для реостатного и конденсаторного пуска при рабочей и пусковой емкостях.
12. Заключение о соотношении пусковых моментов и параметров векторных диаграмм.

Контрольные вопросы

1. Какое назначение пусковой обмотки в однофазном асинхронном электродвигателе?
2. Какое магнитное поле в однофазном электродвигателе без пусковой обмотки: постоянное, пульсирующее, вращающееся круговое, эллиптическое?
3. Какая схема 1-фазного двигателя называется резисторной?
4. Какая схема 1-фазного двигателя называется конденсаторной?
5. Как изменить направление вращения 1-фазного асинхронного электродвигателя?
6. Какой угол сдвига по фазе между токами пусковой и рабочей обмоток считается оптимальным?

Список рекомендуемых источников

1. Назаров Г.И. и др. Электропривод и применение электрической энергии в сельском хозяйстве. — М. : Колос, 1972. — С. 57-64.
2. Электротехнический справочник. — Т. 2. — М. : Энергоатомиздат, 1986. — С. 363.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

Определение моментов инерции в электроприводах аналитическими и экспериментальными методами

Цель работы: изучение способов определения моментов инерции деталей и машин аналитическими и экспериментальными методами, овладение методикой проведения эксперимента.

Программа работы

1. Ознакомиться с устройством установки, записать паспортные данные приборов и оборудования (приложение 5).
2. Определить момент инерции барабана аналитическим методом.
3. Определить момент инерции барабана методом физического маятника.
4. Собрать схему для проведения опыта свободного выбега агрегата.
5. Включить установку и провести опыт по снятию зависимостей $P_{мех} = f(\omega)$ и $n = f(t)$.
6. По данным пункта 5 построить график зависимости $P_{мех} = f(t)$.
7. По данным п.п. 5 и 6 определить момент инерции агрегата.

Описание работы

Момент инерции отдельных симметричных относительно оси вращения однородных тел легко определяется расчетными методами, как произведение массы на квадрат радиуса инерции, который в свою очередь легко вычисляется по размерам детали.

$$J = m\,\rho^2, \tag{5.1}$$

где m — масса тела, кг;

ρ — радиус инерции, м^2.

Для определения моментов инерции симметричных, но неоднородных по физическому составу или сложных по конфигурации деталей, применяются экспериментальные методы: падающего груза, физического маятника и т.д. Когда требуется определить момент инерции целого агрегата с большим количеством подвижных деталей, применяется метод свободного выбега (самоторможения).

В методе физического маятника используется бифилярный подвес, когда испытуемое тело подвешивают на двух нитях так, чтобы оно могло совершать крутильные колебания относительно своей оси. Момент инерции J, кг·м^2, определяют по формуле:

$$J = \frac{a^2}{4\pi\, l}\, m\, T^2, \tag{5.2}$$

где a — расстояние между нитями, м;

l — длина нитей подвеса, м;

m — масса барабана, кг;

T — продолжительность одного полного периода колебаний барабана, с.

Для определения момента инерции методом свободного выбега проводят опты холостого хода и самоторможения. Для этого агрегат приводят во вращение на холостом ходу с помощью электродвигателя постоянного тока, обеспечивающего возможность плавного регулирования скорости в широких пределах.

Мощность, подводимая к якорю двигателя при холостом ходе, затрачивается на потери в стали, потери в обмотке якоря и механические потери в агрегате. Эти суммарные потери можно определить как

$$P_{x.x.} = U_я \, I_я,$$

где $U_я$ — напряжение на якоре, В;
$I_я$ — ток в якоре двигателя, А.

Потери в якоре:

$$P_я = I_я^2 \, r_я,$$

где $r_я$ — сопротивление обмотки якоря, определяемое по паспортным данным двигателя:

$$r_я = 0{,}5 \frac{U_н}{I_H} \left(1 - \eta_H\right),$$

где U_H и I_H — номинальные напряжение и ток двигателя;
$\eta_н$ — номинальный КПД.

Потери в стали и механические определятся как

$$P_{мех} + P_{ст} = P_{x.x.} - P_я. \qquad (5.3)$$

Если опыт самоторможения проводить при включенной обмотке возбуждения, потери в стали будут теми же, что и при опыте холостого хода, и тогда в формуле (5.3) их можно не учитывать, т.е.

$$P_{мех} = P_{x.x.} - P_я.$$

Изменяя скорость от минимальной до номинальной, строят зависимость $P_{мех} = f(\omega)$. При проведении опыта самоторможения агрегат разгоняют до номинальной скорости, затем якорь двигателя отключают от сети и снимают зависимость $\omega = f(t)$. По построенным графикам $\omega = f(t)$ и $P_{мех} = f(\omega)$ строится зависимость $P_{мех} = f(t)$.

Запасенная в подвижных частях агрегата кинетическая энергия расходуется на преодоление механических потерь и потерь в стали, в результате чего он будет затормаживаться до полной остановки. Изменение запаса кинетической энергии при изменении угловой скорости определяется из выражения:

$$A_{мех} = J \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2},$$

где J – приведенный к валу двигателя момент инерции агрегата, кгм^2;
ω_1 и ω_2 – начальная и конечная скорости вала двигателя, 1/с.

Отсюда момент инерции:

$$J = \frac{2A_{мех}}{\omega_1^2 - \omega_2^2}. \qquad (9)$$

Механические потери энергии можно определить как площадь под кривой $P_{мех} = f(t)$.

Порядок выполнения работы

При выполнении работы необходимо определить момент инерции заданной детали аналитическим и опытным методами и получить экспериментальные данные к определению момента инерции агрегата.

1. Аналитическое определение момента инерции детали

Снять геометрические размеры детали, определить ее массу, вычислить радиус инерции и по формуле (5.1) определить момент инерции. Плотность для стали принять равной 7870 кг/м^3 .

2. Определение момента инерции методом физического маятника

Подвесить деталь на нитях, как показано на рис. 5.1, измерить расстояние между нитями и длину подвески. Закрутить подвешенную деталь вокруг оси вращения на некоторый угол (около 45°) и отпустить для свободных крутильных колебаний. Измерить продолжительность одного полного периода и по формуле (5.2) вычислить момент инерции. Результат сравнить с полученным в пункте 1.

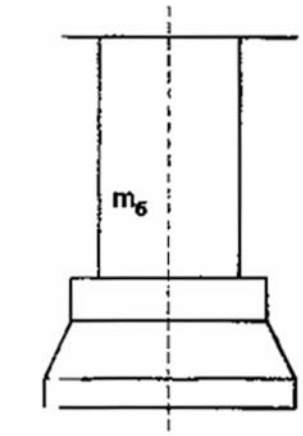

Рис. 5.1. Подвешивание маятника

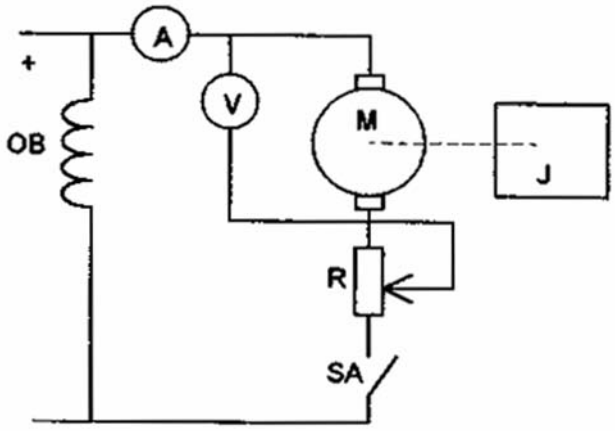

Рис. 5.2. Схема определения момента инерции агрегата

3. Определение момента инерции агрегата

Собрать схему (рис. 5.2) и включить ее в сеть постоянного тока. Изменяя с помощью резисторов в цепи якоря скорость от минимальной до номинальной, записать значения напряжения, тока и скорости для 8-10 точек. Данные измерений занести в таблицу 5.1. При номинальной скорости отключить якорь двигателя от сети и снять зависимость $\omega = f(t)$, записав в таблицу 5.2 значения скорости и времени для 8-10 точек.

Таблица 5.1

Измеренные и расчетные данные эксперимента

Измерено			Вычислено			
n, об./мин	$U_я$, В	$I_я$, А	ω, с$^{-1}$	$P_{х.х.}$, Вт	$P_я$, Вт	$P_{мех}$, Вт

Таблица 5.2

Данные измерений

Параметры	Измерения							
	1	2	3	4	5	6	7	8
t, с								
n, об./мин								
ω, с$^{-1}$								

По данным таблиц 5.1 и 5.2 вычислить и построить графики $P_{мех} = f(\omega)$ и $\omega = f(t)$. Используя эти зависимости, построить график $P_{мех} = f(t)$. Отложить на оси времени точки t_1 и t_2, вычислить площадь под кривой $P_{мех} = f(t)$ и определить момент инерции из выражения

$$J = \frac{2\,S\,m_p\,m_t}{\omega_1^2 - \omega_2^2},$$

где S — площадь под кривой;

m_p и m_t — соответственно масштабы мощности и времени;

ω_1 и ω_2 — значения угловой скорости при t_1 и t_2 по графику $\omega = f(t)$.

Содержание отчета

1. Паспортные данные приборов и оборудования.
2. Расчеты по определению момента инерции аналитическим методом.
3. Электрическая схема включения двигателя.
4. Таблицы с занесенными данными измерений.
5. Графики зависимостей $\omega(t)$, $P_{мех}(\omega)$ и $P_{мех}(t)$.
6. Расчеты по определению моментов инерции экспериментальными методами.
7. Заключение и выводы.

Список рекомендуемых источников

1. Басов А.М. и др. Основы электропривода и управление электроприводом в сельском хозяйстве. — М. : Колос, 1972. — С. 100-101.
2. Олейник В.С. Практикум по основам электропривода. — М. : Колос, 1967. — С. 94-101.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6

Исследование механических переходных процессов в электроприводе с ДПТ независимого возбуждения

Цель работы: исследование механических переходных процессов в электроприводе аналитическими методами и их сопоставление с данными эксперимента.

Программа работы

1. Определить число и величину сопротивлений ступеней пускового резистора для двигателя с маховиком при $I_{п1} = 1{,}5I_{н}$ и $I_{п2} = 0{,}75I_{н}$.
2. Рассчитать значения электромеханической постоянной времени для искусственных и естественной скоростных характеристик двигателя, приняв приведенный момент инерции привода из работы 5.
3. Рассчитать время разбега электропривода на каждой искусственной характеристике и до установившейся скорости.
4. Произвести запуск электродвигателя с автоматическим управлением, измерить время разбега двигателя на каждой ступени сопротивления и до установившейся скорости. Результаты сравнить с расчетными.
5. Измерить пусковые токи двигателя и сравнить с расчётными.

Описание работы

При исследовании механических переходных процессов электропривода предполагается выполнение аналитических и экспериментальных работ, связанных с определением времени разбега электродвигателя с линейной механической характеристикой на отдельных ступенях сопротивлений и до установившейся скорости.

По данным электродвигателя и заданным пределам изменения пускового тока рассчитывается число и сопротивление ступеней пускового резистора. В качестве установившегося тока якоря в данной работе принимается ток холостого хода, измеренный с помощью амперметра. Приведенный момент инерции берётся из работы 5. По этим данным производится расчет электромеханической постоянной времени электропривода и время разбега электродвигателя на отдельных ступенях и до установившейся скорости.

Лабораторная работа выполняется на стенде, представляющем собою электродвигатель постоянного тока с независимым возбуждением, на валу которого установлен маховик с большим моментом инерции (паспортные данные двигателя см. приложение 5). Благодаря этому получают достаточное для визуального наблюдения и измерения в процессе опыта время разбега. Запуск двигателя автоматический с отключением ступеней пускового резистора при снижении пускового тока до $I_{П2}$.

Для визуального наблюдения за изменением тока и измерения времени переходных процессов используется электронный осциллограф марки С1-68.

Перед началом работ необходимо установить на осциллографе масштабы тока и времени.

Выполнение работы

1. Имея заданные значения пускового тока и параметры двигателя, определить число и сопротивления ступеней пускового резистора.

1. Определить сопротивление обмотки якоря:

$$r_я = \frac{0{,}5\,U_н\,(1-\eta_н)}{I_н},$$

где $U_я$ — номинальное напряжение двигателя, В;
$I_н$ — номинальный ток двигателя, А;
$\eta_н$ — номинальное КПД двигателя.

Коэффициент полезного действия определяется по формуле

$$\eta_н = \frac{P_н}{\left(U_н\ I_н\right)},$$

где $P_н$ — номинальная мощность двигателя.

2. Определить *число ступеней пускового резистора* из выражения

$$m_1 = \frac{\ln(\frac{R_m}{r_я})}{\ln\lambda}.$$

3. Найденное число ступеней m_1 округлить до целого числа m и определить соответствующую ему кратность пусковых токов:

$$\lambda_1 = \left(\frac{R_m}{r_я}\right)^{\frac{1}{m}}.$$

4. Определить сопротивление каждой ступени пускового резистора:

$$R_1 = r_я\left(\lambda_1 - 1\right)\lambda_1^{\,m-1}; \qquad (6.1)$$

$$R_2 = r_я\left(\lambda_1 - 1\right)\lambda_1^{\,m-2}; \qquad (6.2)$$

$$R_m = r_я\left(\lambda_1 - 1\right). \qquad (6.3)$$

2. Определить время разбега для каждой ступени сопротивлений пускового резистора.

1. Определить электромеханическую постоянную времени (пусковую) при $s = 1$, как:

$$B_п = J \frac{\omega_0}{M_н},$$

где J — приведенный момент инерции, кг·м^2;

$M_н$ — номинальный момент двигателя, Н·м;

ω_0 — угловая скорость идеального холостого хода, с$^{-1}$.

2. Определить скольжение при номинальном моменте для естественной и искусственных скоростных характеристик:

$$s_н = \frac{\omega_0 - \omega_н}{\omega_0},$$

$$s_{нх} = s_н \frac{r_я + R_x}{r_я},$$

где R_x — добавочное сопротивление, определяемое по формулам (6.1-6.3).

3. Определить электромеханические постоянные времени для естественной и искусственных характеристик:

$$B_x = B_п \, s_{нх}.$$

Электромеханическая постоянная времени на искусственных и естественной скоростных характеристиках может определяться также из выражения:

$$B_x = B_п \, \rho_x,$$

где ρ_x — относительное сопротивление в цепи обмотки якоря:

$$\rho_x = \frac{R_x + r_я}{R_н};$$

$R_н$ — номинальное сопротивление якорной цепи:

$$R_н = \frac{U_н}{I_н}.$$

4. Определить время разбега на искусственных характеристиках:

$$t_x = B_x \ln \frac{I_{нач} - I_c}{I_{кон} - I_c}$$

и на естественной характеристике:

$$t_e = B_e \ln \frac{I_{нач} - I_c}{0{,}05\, I_c},$$

где $I_{нач}\, I_{кон}$ — пусковые токи $I_{нач} = I_{п1},\ I_{кон} = I_{п2}$;

I_c — установившийся ток, измеренный амперметром после окончания разбега двигателя.

После завершения расчетов по определению сопротивлений пускового резистора и времени разбега включить двигатель по схеме (рис. 6.1) и убедиться в его исправной работе и работе измерительных приборов. С помощью амперметра и секундомера определить масштабы тока и времени на осциллографе и произвести измерения времени разбега двигателя на каждой ступени пускового резистора и до установившейся скорости.

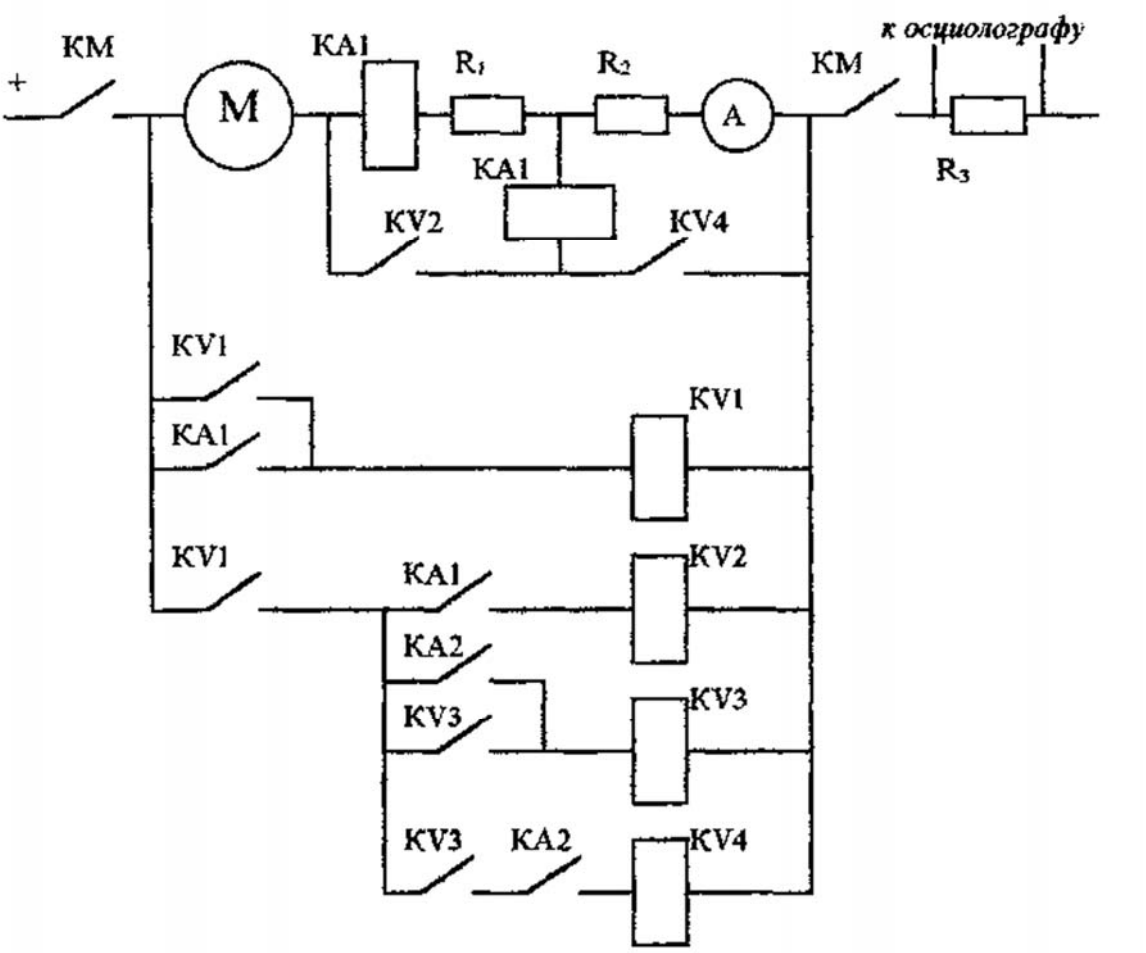

Рис. 6.1. Схема пуска двигателя

Измерить по осциллографу значения пусковых токов и по остаточному следу пятна на осциллографе начертить кривую изменения тока в переходном режиме. По уравнениям переходных процессов вычислить и построить на том же графике теоретические кривые изменения токов.

Содержание отчета

1. Паспортные данные оборудования и приборов.
2. Принципиальная электрическая схема установки.
3. Расчёт сопротивлений пускового резистора.
4. Расчеты по определению времени разбега двигателя на всех ступенях пускового резистора.
5. Время разбега двигателя, полученное опытным путем.

6. Пусковая диаграмма токов двигателя.
7. Графики изменения тока во времени, полученные расчетным методом и с помощью осциллографа.
8. Заключение по работе.

Контрольные вопросы

1. По какому закону изменяется ток якоря в переходном режиме при постоянной нагрузке?
2. Как определить электромеханическую постоянную времени при работе на данной характеристике?
3. Как рассчитать время разбега двигателя на искусственных скоростных характеристиках?
4. Как рассчитать время разбега двигателя на естественной характеристике, когда ток стремится к установившемуся значению?

Список рекомендуемых источников

1. Басов А.М. и др. Основы электропривода и автоматическое управление электроприводом в сельском хозяйстве. — М. : Колос, 1972. — С. 118-128.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7
Исследование механических переходных процессов в электроприводе с асинхронным электродвигателем

Цель работы: изучение механических переходных процессов в электроприводе с асинхронным короткозамкнутым двигателем и определение времени разбега расчетным и экспериментальным методами.

Программа работы

1. Определить приведенный момент инерции в экспериментальной установке.
2. По данным паспорта электродвигателя и каталога построить механические характеристики двигателя и рабочей машины.
3. Определить время разбега электродвигателя методом конечных разностей.
4. Измерить время разбега при пуске двигателя вхолостую и сравнить его с расчетным.

Описание работы

Характер изменения во времени основных параметров, характеризующих работу электропривода, при переходе от одного установившегося значения скорости к другому установившемуся значению скорости называется переходным процессом. Переходные процессы могут быть вызваны изменением подводимого напряжения, нагрузки, частоты тока и т.п. В переходном процессе изменяются скорость, момент, развиваемый двигателем, ток, скольжение.

Изменение параметров привода не может происходить мгновенно вследствие того, что для изменения запаса кинетической энергии в подвижных частях привода при конечных значениях движущих и тормозных моментов требуется определенное время.

В зависимости от типа электродвигателя, различные задачи, связанные с переходными процессами, могут решаться аналитическими, графоаналитическими или графическими методами. В случае с асинхронным двигателем с его нелинейной механической характеристикой аналитические методы решения либо невозможны, либо сложны, и тогда прибегают к приближенным графическим или графоаналитическим методам.

В данной работе для определения времени разбега электропривода с асинхронным короткозамкнутым двигателем рекомендуется применить графоаналитический метод конечных разностей. Для этого строятся графики механической характеристики электродвигателя и рабочей машины, затем весь диапазон от скорости равной нулю до установившейся разбивают на отдельные участки (8-10 участков). В пределах каждого из них

действительные кривые изменения моментов заменяют постоянными эквивалентными значениями, а время разбега на отдельных участках скорости определяется по известной зависимости:

$$\triangle t_i = \frac{J\,\Delta\omega_i}{M_{di} - M_{ci}},$$

а полное время определится как

$$t_p = \triangle t_1 + \triangle t_2 + \Delta t_3 + \cdots + \triangle t_n,$$

где M_{di} — момент, развиваемый двигателем на *i*-ом участке;
M_{di} — момент сопротивления на *i*-м участке;
J — момент инерции двигателя и маховика, насаженного на его валу.

Полученный результат расчета времени разбега требуется проверить опытным путем. В данной работе эта проверка выполняется на электродвигателе с увеличенным моментом инерции на валу при пониженном напряжении. Для фиксирования времени разбега применен осциллограф типа С1-68, на экране которого можно наблюдать за изменением тока статора в переходном режиме.

Порядок выполнения работы

Для расчета времени разбега графоаналитическим методом построить механическую характеристику двигателя по 4-м точкам: *Мп*, *Мк*, *Мн* и $M = 0$ при пониженном напряжении до 110 В. Поскольку моменты асинхронных двигателей пропорциональны квадрату напряжения, при построении механической характеристики соответствующие моменты следует умножать на отношение $(380/110)^2$.

Момент сопротивления на валу двигателя принять постоянным, равным $M_c = 0{,}066$ Н·м.

После разбивки скорости на отдельные участки произвести замену действительных моментов постоянными эквивалентными значениями. Для этого кривую момента на каждом участке скорости заменяют прямой линией таким образом, чтобы отбрасываемая площадка равнялась приписываемой.

Полученное расчетным методом значение времени разбега сравнить с действительным, полученным опытным путем при напряжении 110 В. Время разбега измеряется с помощью осциллографа по изменению тока в переходном режиме. Для этого перед пуском двигателя на осциллографе необходимо установить приемлемый масштаб времени и произвести несколько пробных пусков.

Содержание отчета

1. Паспортные данные электродвигателя и приборов.
2. Формулы и вычисления для построения механической характеристики двигателя: при напряжении, принятом для опыта.
3. Графики механических характеристик электродвигателя и момента сопротивления с необходимыми построениями для определения времени разбега.
4. Вычисления времени на участках и общего времени разбега.
5. Время, полученное опытным методом.

Контрольные вопросы

1. Что называется переходным процессом?
2. Какие существуют способы определения времени разбега электроприводов?
3. Почему в электроприводе с асинхронным электродвигателем не всегда применимы аналитические методы расчёта переходных процессов?
4. Для чего в основном уравнении движения необходимо приведение к скорости одного вала моментов и моментов инерции?
5. Почему данная работа проводилась при пониженном напряжении?

Список рекомендуемых источников

1. Басов А.М. и др. Основы электропривода и автоматическое управление электроприводом в сельском хозяйстве. — М. : Колос, 1972. — С. 146-151.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10

Исследование процесса нагрева и определение номинальной мощности электродвигателя по нагреву

Цель работы: исследовать процесс нагрева электродвигателя при постоянной нагрузке, установить основные параметры нагрева опытным путем, определить номинальную мощность электродвигателя по нагреву.

Программа работы

1. Ознакомиться с приборами и оборудованием лабораторной установки.
2. Собрать схему для проведения опыта.
3. Снять зависимость превышения температуры электродвигателя от времени при постоянной нагрузке опытным путем.
4. Определить установившееся значение превышения температуры двигателя.
5. Определить постоянную времени нагрева.
6. Определить номинальную мощность электродвигателя.
7. Построить кривую нагрева по данным аналитических расчетов при той же нагрузке.
8. Пересчитать мощность двигателя на работу при температуре окружающей среды, не равной расчетной.

Описание работы

Мощность любого электродвигателя ограничивается его допустимым нагревом. Причиной нагрева являются потери, связанные с процессом преобразования электрической энергии в механическую. Изоляция обмотки в большей степени, чем другие части машины, чувствительна к воздействию высокой температуры. Установлено, что нагрев изоляции свыше допустимой температуры ведет к резкому сокращению срока службы.

Для каждого класса изоляции (кроме класса С) установлена предельно допустимая температура нагрева.

В процессе работы температура нагрева двигателя складывается из температуры окружающей среды и превышения температуры.

Превышение температуры двигателя зависит от нагрузки, так как с увеличением нагрузки возрастает ток и потери в двигателе. Чем выше температура окружающей среды, тем ниже допустимое превышение температуры, а следовательно, и допустимая нагрузка двигателя. За расчетную принята температура окружающей среды +40 °С. 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:

$$\tau = \tau_{уст}\left(1 - e^{-t/T}\right) + \tau_0\, e^{-t/T}, \qquad (10.1)$$

где τ — превышение температуры, °С;
$\tau_{уст}$ — установившееся превышение температуры, °С;
τ_0 — начальное превышение температуры, °С;
t — время нагрева, с;
T — постоянная времени нагрева, с.

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

На рис. 10.1 показаны кривые нагрева при $\tau_{нач} = 0$ (кривая 1) и при $\tau_{нач} \neq 0$ (кривая 2). После включения двигателя в работу с постоянной нагрузкой его температура растет, и по истечении определенного времени наступает тепловое равновесие, когда превышение температуры достигает своего установившегося значения τ_y (это время принимается равным 4…5 T).

—

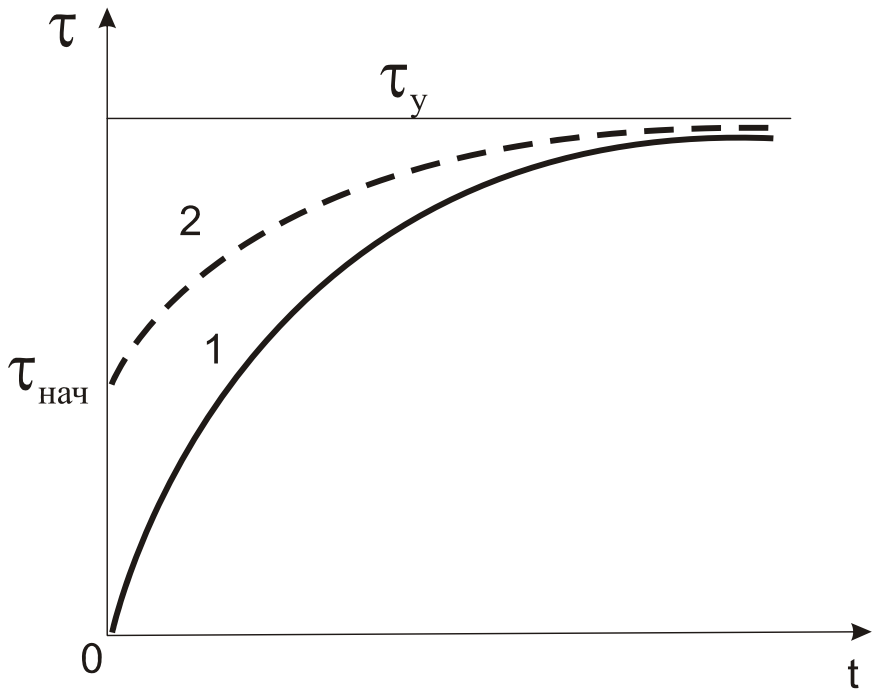

Рис. 10.1. Изменение превышения температуры при P = const:
1 — $\tau_{нач} = 0$; 2 — $\tau_{нач} \neq 0$

Величина, характеризующая скорость процесса нагревания, называется постоянной времени нагрева T.

Постоянная времени нагрева зависит от конструктивных факторов двигателя и определяется, как отношение его теплоемкости к теплоотдаче:

$$T = \frac{C}{A}.$$

Если температура окружающей среды превышает расчетную, допустимая нагрузка двигателя должна быть уменьшена по сравнению с паспортной. Пересчет мощности при температуре окружающей среды, отличной от расчетной ведется по формуле:

$$P_x = P_н \sqrt{1 + \frac{\Delta\Theta}{\tau_{доп}}(1+\alpha)} \qquad (3)$$

где $\Delta\Theta = 40° - \Theta_{окр}$ — разность между температурой расчетной и фактической температурой окружающей среды $\Theta_{окр}$;

P_X — допустимая мощность двигателя при температуре окружающей среды, отличной от расчетной;

$P_Н$ — номинальная мощность двигателя по паспорту;

$\tau_{доп}$ — допустимое превышение температуры двигателя для данного класса изоляции, выполняется как $\tau_{доп} = Q_{доп} - Q_{окр}$;

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

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с установкой для исследования нагрева электродвигателей и собрать ее электрическую схему согласно рис. 10.2.

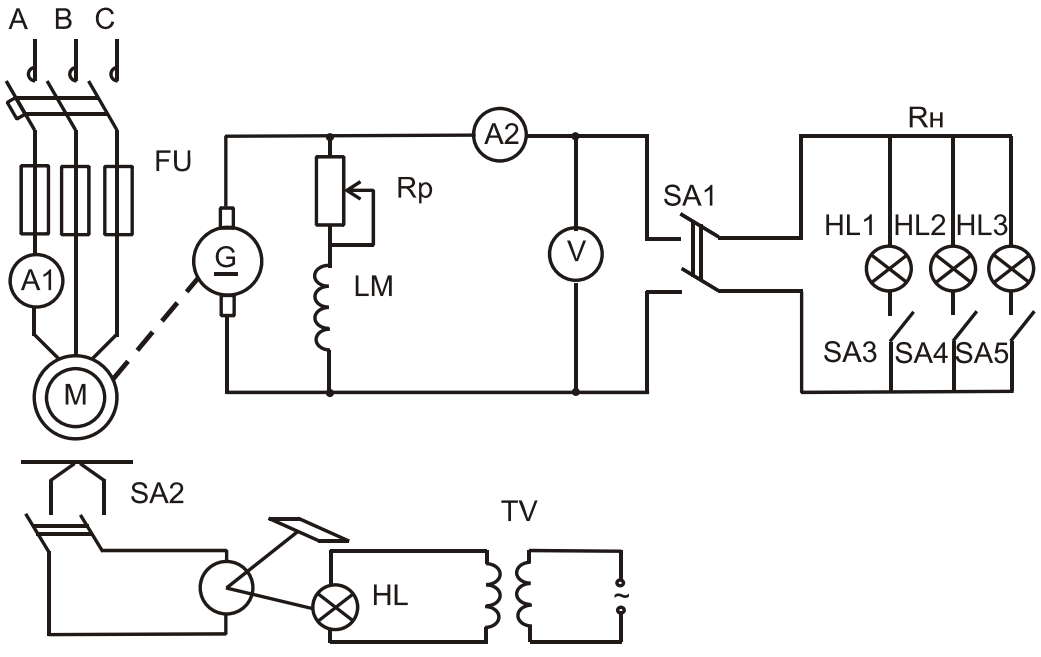

Рис. 10.2. Установка для исследования нагрева электродвигателей

Опыт нагрева производится на асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором. Для измерения температуры в один из пазов статора вмонтирована термопара, которая подключена к зеркальному гальванометру. Если между холодным и горячим спаями термопары имеется разность температур, то в контуре возникает электродвижущая сила, пропорциональная разности температур. В данном случае она пропорциональна превышению температуры двигателя над температурой окружающей среды. Измерив с помощью гальванометра величину электродвижущей силы, можно по тарировочной кривой определить это превышение.

Нагрузка на валу исследуемого двигателя создается генератором постоянного тока G, который, в свою очередь, нагружен сопротивлением R_H. Для регулирования напряжения генератора последовательно с обмоткой возбуждения включено сопротивление R_p. При пуске необходимо следить, чтобы агрегат вращался в сторону, указанную стрелкой.

2. Дать электродвигателю нагрузку путем включения ламп HL (величина нагрузки задается преподавателем и контролируется по амперметру A2) и снять данные по нагреву $\tau(t)$. Измерения производить в момент включения и через каждые 5 минут в течение 30-40 минут. В процессе опыта следить, чтобы ток нагрузки поддерживался постоянным. Данные опытов записать в таблицу 10.1.

Таблица 10.1

Опытные данные

Время отсчета	Показания гальванометра	Превышение температуры	Напряжение нагрузки	Ток нагрузки	Мощность нагрузки
Минуты	Деления	°С	В	А	Вт

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

Для того чтобы опытным путем получить установившееся превышение температуры, требуется длительное время. Однако можно, имея часть кривой нагрева, определить ее графически. Для этого на оси абсцисс графика $\tau(t)$ необходимо отложить два одинаковых отрезка Δt и из их концов восстановить перпендикуляры до пересечения с линией $\tau(t)$. Через полученные точки пересечения провести горизонтальные линии. Слева от оси ординат на этих линиях отложить n-е число приращений температуры $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$ (рис. 10.3).

Через концы полученных отрезков провести наклонную линию до пересечения с осью ординат. Точка пересечения определяет искомое значение $\tau_{уст}$.

Отрезки Δt следует брать по возможности большими.

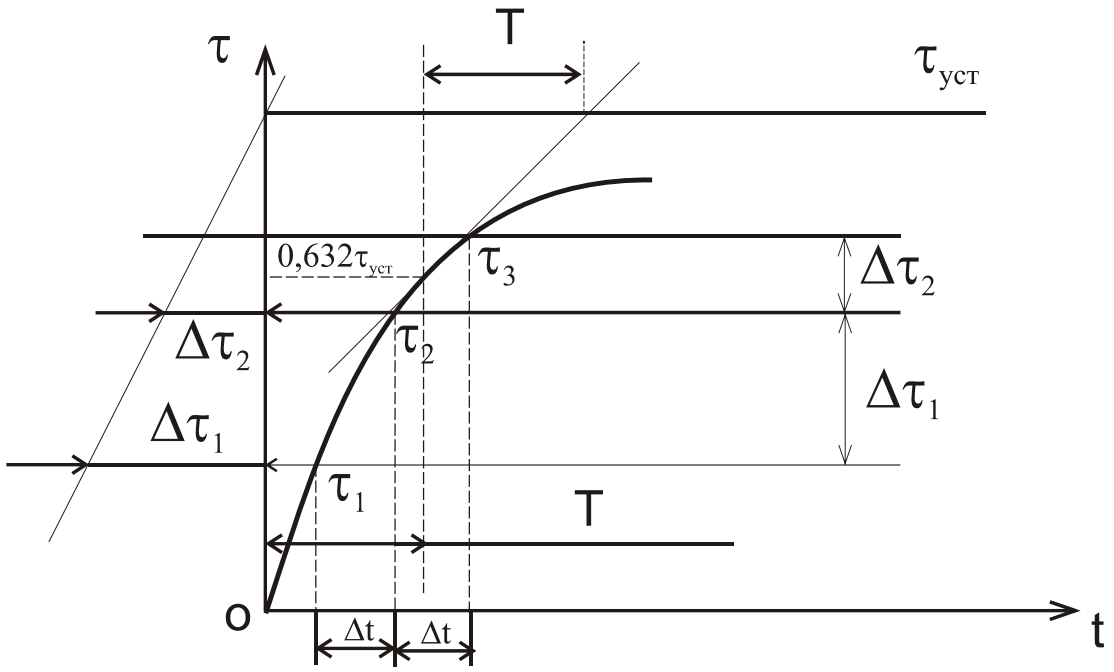

Рис. 10.3. Определение установившегося превышения температуры

4. Определить постоянную времени нагрева тремя методами.

Метод касательной (см. рис. 10.3). Провести касательную к кривой нагрева в любой точке. Отрезок прямой, расположенный между проекцией точки касания на линию $\tau_{уст}$ и точкой пересечения касательной с этой линией, равен в принятом масштабе значению постоянной времени нагрева. Метод касательной следует повторить три раза: в начале, середине и в конце опыта.

Метод трех точек. На кривой нагрева выбираются три точки, соответствующие двум равным приращениям времени Δt (см. рис. 10.3). Постоянная времени нагрева вычисляется по формуле:

$$T = \frac{\Delta t}{\ln \dfrac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_3 - \tau_2}}. \qquad (3)$$

Метод начального нагрева. На оси ординат отложить $\tau = 0{,}632\ \tau_{уст}$ и провести горизонталь до пересечения с линией $\tau = f(t)$. Проекция точки пересечения на ось абсцисс даст отрезок, равный в масштабе постоянной времени нагрева.

За истинное значение постоянной времени нагрева принимается среднее из полученных трех значений.

5. Определить номинальную мощность электродвигателя. Величина установившегося превышения $\tau_{уст}$ зависит от потерь ΔP в двигателе и коэффициента теплоотдачи A:

$$\tau_{уст} = \frac{\Delta P}{A}.$$

Если пренебречь постоянными потерями, можно считать, что ΔP пропорционально квадрату нагрузки P.

Следовательно

$$\frac{\tau_{уст.н}}{\tau_{уст}} = \frac{P_н^2}{P^2}, \qquad (10.3)$$

где $\tau_{уст.н}$ — установившееся превышение температуры при номинальной нагрузке. Для изоляции класса А $\tau_{уст.н}$ = 60 °С, класса Е — 75 °С и т.д.;

$\tau_{уст}$ — установившееся превышение температуры при нагрузке P;

$P_Н$ — номинальная мощность двигателя;

P — мощность нагрузки при опыте:

$$P = U\,I + P_{х.х.}$$

здесь U и I — напряжение и ток нагрузки из таблицы 10.1;

$P_{х.х.}$ — потери холостого хода агрегата генератор-двигатель, принять $P_{х.х.}$ = 850 Вт.

Из формулы (10.3) следует:

$$P_н = P\sqrt{\frac{\tau_{уст.н}}{\tau_{уст}}}.$$

6. Построить кривую нагрева двигателя по уравнению (10.1) для нагрузки при проведении опыта, приняв τ_o равным начальному перед началом.

7. Пересчитать мощность двигателя на работу при температуре окружающей среды, неравной расчетной, по формуле (10.2). Значение температуры окружающей среды задается преподавателем.

Содержание отчета

1. Принципиальная электрическая схема установки.
2. Паспортные данные приборов и оборудования.
3. Таблица данных наблюдений и вычислений.
4. Расчетные формулы и вычисления.
5. Экспериментальные и расчетные кривые нагрева (выполняются на одном графике).

6. Результаты расчетов по определению установившегося превышения температуры двигателя.
7. Результаты расчетов по определению постоянной времени нагрева двигателя.
8. Результаты расчетов по определению номинальной мощности электродвигателя.
9. Результат пересчета номинальной мощности двигателя на работу при температуре окружающей среды, отличной от расчетной.

Контрольные вопросы

1. Чем ограничивается допустимая нагрузка электродвигателя?
2. Какие классы изоляции применяются в электродвигателях?
3. Что такое превышение температуры двигателя?
4. Что называют установившимся превышением двигателя?
5. Что называют допустимым превышение температуры электродвигателя?
6. Как определить установившуюся температуру двигателя?
7. Как определить постоянную времени нагрева двигателя?

Список рекомендуемой литературы

1. Басов А.М. Основы электропривода и автоматическое управление электроприводом в сельском хозяйстве / А.М. Басов, А.Т. Шаповалов, С.А. Кожевников. — М. : Колос, 1972.
2. Москаленко В.В. Электрический привод. — М. : Высш. шк., 1991.
3. Олейник В.С. Практикум по основам электропривода. — М. : Колос, 1967.
4. Савченко П.И. Практикум по электроприводу в сельском хозяйстве. — М. : Колос, 1996.
5. Шичков Л.П. Электрический привод. — М. : РГАЗУ, 2003.
6. Чиликин М.Г., Сандлер С.А. Общий курс электропривода. — М. : Энергоиздат, 1981.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Паспортные и справочные данные электродвигателей универсальных стендов

Приложение 1

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СТЕНД № 1

Двигатели М1 и М2		**Двигатель М3**	
Тип	ПН-10	Тип	П-41
Мощность	0,65 кВт	Мощность	2,7 кВт
$n_н$	980 об./мин	$n_н$	1450 об./мин
$U_н$	110 В	$U_н$	115 В
$I_н$	7,4 А	$I_н$	31 А
$\eta_н$	80%	$\eta_н$	75,5%
$r_в$	100 Ом	$r_в$	100 Ом

Приложение 2

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СТЕНД № 2

Двигатель М1		**Двигатель М2**	
Тип	ПН-10	Тип	П-22
Мощность	0,65 кВт	Мощность	1,0 кВт
$n_н$	980 об./мин	$n_н$	1500 об./мин
$U_н$	110 В	$U_н$	220 В
$I_н$	7,4 А	$I_н$	5,9 А
$\eta_н$	80%	$\eta_н$	78,5%
$r_в$	100 Ом	$r_в$	700 Ом

Двигатель М3		**Двигатель М4**	
Тип	ПН-12	Тип	АОЛ2-12-2
Мощность	1,0 кВт	Мощность	1,1 кВт
$n_н$	3000 об./мин	n_0	3000 об./мин
$U_н$	220 В	$U_н$	220/380 В
$I_н$	5,9 А	$I_н$	4,2/2,4 А
$\eta_н$	76%	$\eta_н$	79,5%
$r_в$	800 Ом	$cos\varphi_н$	0,87 Ом
		$S_н$	0,056
		m_k	2,7
		m_0	2,1
		k_i	5,3

Приложение 3

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СТЕНД № 3

Двигатели М1 и М2		**Двигатель М3**	
Тип	П-41	Тип	П-55
$P_н$	3,2 кВт	$P_н$	4,5к Вт
n	1500 об./мин	n	3000 об./мин
$U_н$	110 В	$U_н$	110 В
$I_н$	36,1 А	$I_н$	48,4 А
η	0,77	η	0,84
$r_в$	113 Ом	$r_в$	72 Ом

Двигатель М4

Тип	MTF-111-6У1
$P_н$	3,5 кВт
$U_{1н}$	220/380 В
$U_{2н}$	165 В
$I_{1н}$	18/10,4 А
$n_н$	895 об./мин
$\eta_н$	70,5%
$\cos\varphi_н$	0,78
k_i	3,6
μ_k	2,0 Ом
r_2	1,0 Ом
R_p	4,4 Ом
$R_{1ст.}$	3,4 Ом

Приложение 4

Технические данные двигателя

Тип	А-41-6
$P_н$	1 кВт
$U_н$	*220/380 В*
$s_н$	7%
$\eta_н$	77%
$\cos\ \phi_н$	0,72
i_n	4,0
μ_k	1,8
μ_n	1,3

Приложение 5

Технические данные двигателя

Тип	П-21
$P_н$	0,3 кВт
$U_н$	110 В
$I_н$	4,2 А
$n_н$	1000 об./мин

Приложение 6

Технические данные двигателя

Тип	4А71В4У3
$P_н$	0,75 кВт
$U_н$	220/380 В
S_H	0,087
η_H	0,72
$\cos\ \varphi_H$	0,73
J	0,0014 кг/м^2
μ_k	2,2
μ_o	2,0

Учебно-практическое издание

Электропривод. Ч. I : лабораторный практикум для студентов специальности 110302 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» очной формы обучения / сост. А.С. Симоненко. — 2-е изд., перераб. и доп. — Кострома, 2008. — 60 с.

Гл. редактор Н.В. Киселева
Редактор выпуска Т.В. Тарбеева
Корректор М.М. Мазина