

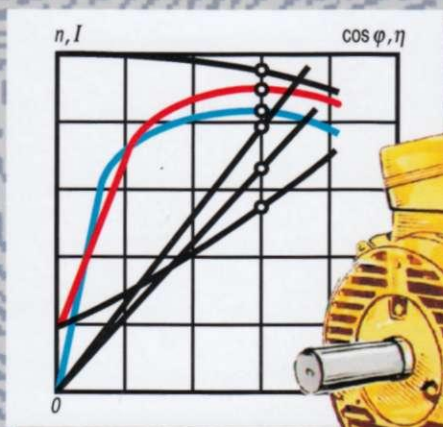
ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

М. М. Кацман

# ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ ПРИВОДУ

9-е издание

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

2013/2018  
130

М. М. КАЦМАН

# ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ ПРИВОДУ

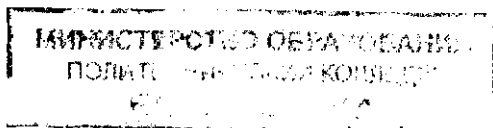
10485  
98401

*Рекомендовано*

*Федеральным государственным автономным учреждением  
«Федеральный институт развития образования» (ФГАУ «ФИРО»)  
в качестве учебного пособия для использования в учебном процессе  
образовательных учреждений, реализующих программы СПО*

*Регистрационный номер рецензии 756  
от 26 декабря 2012 г. ФГАУ «ФИРО»*

9-е издание, стереотипное



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2016

УДК 621.313(075.32)  
ББК 31.26я723  
К30

Рецензент —

*Е. П. Рудобаба* (Московский государственный техникум технологий,  
экономики и права им. Л. Б. Красина)

98401

**Кацман М. М.**

К30 Лабораторные работы по электрическим машинам и электрическому приводу : учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / М. М. Кацман. — 9-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2016. — 256 с.

ISBN 978-5-4468-3049-7

Книга содержит указания по организации работы студентов в лабораториях электрических машин и электрического привода. В ней приведено содержание лабораторных работ, каждая из которых включает программу работы, указания по подготовке к ней, описания экспериментов и методические указания по их выполнению, а также рекомендации по анализу результатов экспериментов и выполнению отчета о проделанной работе.

Учебное пособие может быть использовано при освоении профессионального модуля ПМ.01 «Организация технического обслуживания и ремонта электрического и электромеханического оборудования» (МДК.01.01) по специальности «Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования».

Для студентов учреждений среднего профессионального образования. Пособие может быть полезно студентам вузов.



УДК 621.313(075.32)  
ББК 31.26я723

*Оригинал-макет данного издания является собственностью  
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом  
без согласия правообладателя запрещается*

© Кацман М. М., 2004

© Светова Т. И. (наследница автора Кацмана М. М.), 2014

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2014

ISBN 978-5-4468-3049-7

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2014

## ПРЕДИСЛОВИЕ

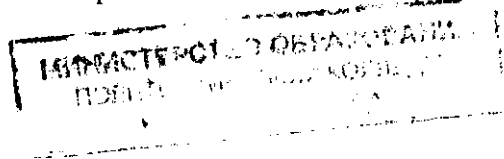
В учебном процессе наряду с теоретическим обучением значительное место отводится лабораторным работам. Правильное сочетание теоретических знаний с практикой выполнения лабораторных работ обеспечивает высокое качество подготовки специалистов.

584С1  
Книга представляет собой руководство по выполнению лабораторных работ, составленное в соответствии с учебными программами предметов «Электрические машины» и «Электрический привод» для специальностей «Электрические машины и аппараты», «Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника» и «Техническая эксплуатация, обслуживание и ремонт электрического и электромеханического оборудования».

Книга содержит правила техники безопасности при работе с электрическими машинами, описание средств и методов нагрузки электрических машин, общие указания по сборке электрических схем, методике измерений и обработке результатов экспериментов. В каждом описании лабораторной работы значительное внимание уделено четкой формулировке программы лабораторной работы, порядку ее выполнения, описанию лабораторных установок и критическому анализу результатов экспериментов при оформлении отчетов по лабораторным работам. Кроме того, описания лабораторных работ раздела «Электрический привод» содержат теоретические сведения («Основные понятия»), необходимые при подготовке к их выполнению.

Перечень приведенных в книге лабораторных работ выходит за пределы учебных программ, что дает возможность методическим комиссиям учебных заведений при планировании учебного процесса корректировать намечаемые к выполнению лабораторные работы с учетом специализации студентов.

Книга предназначена для студентов электротехнических специальностей учреждений среднего профессионального образования. Она также может быть полезна специалистам, желающим расширить свои познания в области электрических машин и электрического привода.



## ВВЕДЕНИЕ

### В.1. Организация и порядок проведения лабораторных работ

Лабораторные работы по предметам «Электрические машины» и «Электрический привод» знакомят студентов с устройством трансформаторов, электрических машин, электромашинных элементов электропривода, типовых схем автоматического электропривода и позволяют экспериментально проверить основные положения теории, приобрести навыки по сборке электрических схем, содержащих электрические машины, трансформаторы, пускорегулирующую аппаратуру, измерительные устройства. Непосредственное участие в экспериментах вырабатывает у студентов практические навыки по методике проведения опытов и обработке их результатов. По полученным данным лабораторного исследования студенты должны научиться оценивать свойства электрических машин и систем электропривода.

Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы, необходимо: тщательно изучить содержание работы и порядок ее выполнения; повторить теоретический материал; подготовить таблицы для занесения результатов наблюдений и вычислений. Студент должен иметь отдельную рабочую тетрадь для записей, необходимых для составления отчета о проделанной работе. Чтобы избежать возможных ошибок при чтении принципиальных схем и ознакомлении с лабораторными стендами, нужно знать условные обозначения и буквенные коды электротехнических элементов и устройств, соответствующих действующему стандарту (см. прил. 1 и 2).

Лабораторные работы выполняются бригадами, обычно из 3 – 5 человек. Такой количественный состав определяется необходимостью одновременного снятия большого числа показаний измерительных приборов и регулировкой нескольких параметров исследуемого объекта. В процессе работы каждый член бригады выполняет определенные обязанности. В последующих работах эти обязанности должны меняться так, чтобы каждый член бригады смог приобрести навыки по различным видам работ лабораторного исследования. При завершении работы студенты составляют отчет. Лабораторная работа засчитывается, если отчет соответствует предъявляемым требованиям и если студент ответил на вопросы преподавателя. При этом студент должен знать устройство и принцип работы объекта исследования, назначение всех элементов схемы и пони-

мать физические процессы, объясняющие полученные результаты, а также уметь объяснить порядок действий при выполнении любого эксперимента в лабораторной работе.

## **В.2. Техника безопасности при работах в лабораториях электрических машин и электрического привода**

Лабораторные стенды и агрегаты в лабораториях электрических машин и электрического привода являются действующими электроустановками, отдельные элементы которых находятся под напряжением. Поэтому при определенных условиях, возникающих из-за нарушения установленных правил, лабораторные стенды могут стать источником поражения человека электрическим током и других видов травматизма. Положение усугубляется еще и особенностью монтажа элементов лабораторного стенда, предусматривающей максимальную доступность к приборам, машинам и пускорегулирующей аппаратуре, а также создающей дополнительные опасности при выполнении лабораторных работ.

Тело человека обладает электропроводимостью, поэтому при соприкосновении с двумя неизолированными элементами установки, находящимися под напряжением (одним из этих элементов может оказаться корпус электрической машины или трансформатора), через тело человека проходит электрический ток. Достигнув опасных значений, этот ток приводит либо к сильным ожогам (электрическая травма), либо к тяжелым поражениям нервной, сердечной и дыхательной систем организма человека (электрический удар). Последствия поражения электрическим током бывают тяжелыми и могут привести к смертельному исходу.

Специфика работы с электрическими машинами состоит в том, что при несоблюдении правил техники безопасности студент подвергается не только опасности поражения электрическим током, но и опасности механических ударов вращающимися частями электрических машин и тормозных устройств. Необходимо помнить, что многие элементы схемы лабораторной установки, находящиеся под напряжением, доступны для прикосновения, а вращающиеся части хотя и имеют обычно защитные устройства, все же не исключают «захвата» частей одежды или механического удара. Поэтому студенты в лаборатории должны соблюдать исключительную осторожность и *правила техники безопасности*:

1) студент, находясь в лаборатории, должен быть предельно дисциплинированным и внимательным; беспрекословно выполнять все указания преподавателей и лаборантов; находиться непосредственно у исследуемой лабораторной установки;

2) запрещается подходить к другим установкам, распределительным щитам и пультам и делать на них какие-либо включения или

переключения; включать лабораторную установку в сеть, если кто-нибудь касается ее неизолированной токоведущей части; производить в ней какие-либо присоединения, если установка находится под напряжением; во время работы электрической машины касаться вращающихся частей или наклоняться к ним близко; оставлять без наблюдения лабораторную установку или отдельные ее приборы под напряжением;

3) при перемещениях движков и рукояток пускорегулирующей аппаратуры необходимо следить за тем, чтобы рука была в соприкосновении только с изолированной рукояткой;

4) одежда не должна иметь свободно свисающих концов шарфов, косынок, галстуков и т.п., а прическа или головной убор должны исключать возможность «свисания» прядей волос;

5) если схема содержит конденсаторы, то после ее отключения необходимо разрядить конденсаторы, замкнув накоротко их выводы;

6) при работе с лабораторной установкой, находящейся под напряжением, студенты должны стоять на изоляционных резиновых ковриках;

7) о всех замеченных случаях неисправности в работе установок и нарушении правил техники безопасности студент должен немедленно доложить преподавателю;

8) если произошел несчастный случай, лабораторную установку следует немедленно отключить, оказать пострадавшему первую помощь, одновременно сообщив об этом преподавателю.

Инструктаж по технике безопасности должен быть зафиксирован в специальном журнале, где каждый студент после изучения правил техники безопасности должен расписаться.

### В.3. Пускорегулирующая аппаратура

**Пусковые реостаты.** Для ограничения тока при пуске электродвигателей служат пусковые реостаты ПР. При пуске асинхронных двигателей с фазным ротором применяют *трехфазные пусковые реостаты*. Такой реостат состоит из трех ветвей резисторов (рис. В.1, а), каждая из которых присоединяется к выводу одной из фазных обмоток ротора (Р1, Р2, Р3). При пуске двигателя резисторы этих ветвей замыкаются через подвижные контакты, соединенные «звездой». Каждая из ветвей имеет несколько ответвлений к неподвижным контактам, так что при перемещении рукоятки с подвижными контактами по часовой стрелке осуществляется ступенчатое переключение резисторов пускового реостата. В начальный период пуска двигателя указатель на рукоятке должен находиться против отметки «Пуск», а три подвижных контакта — на нулевых неподвижных контактах. В этом случае обмотка ротора двигателя разом-

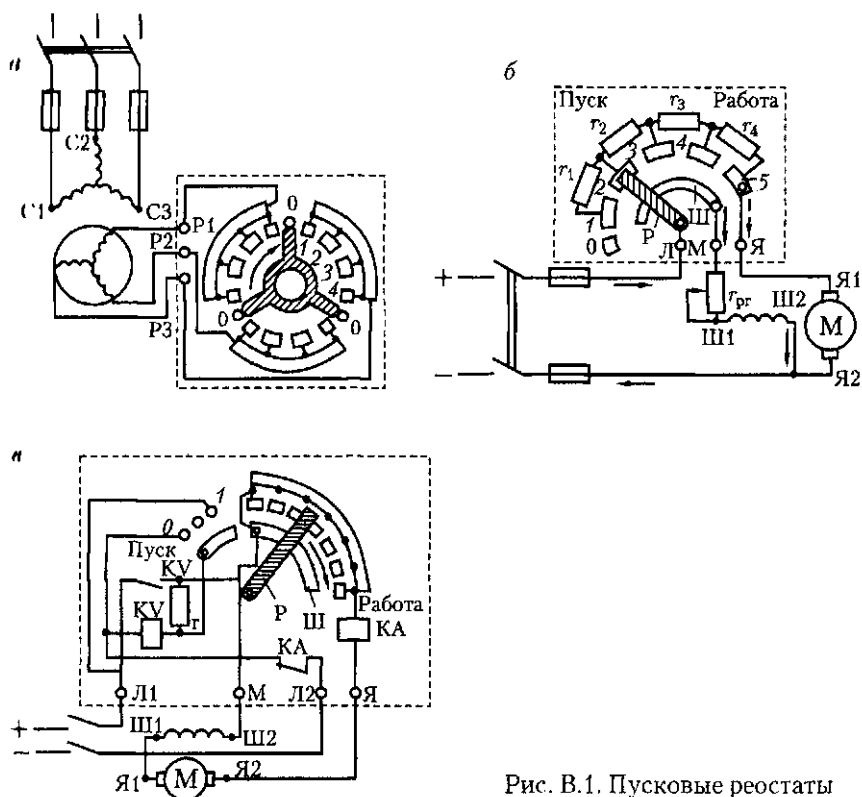


Рис. В.1. Пусковые реостаты

кнута. После включения в сеть обмотки статора двигателя рукоятку реостата медленно перемещают по часовой стрелке, при этом электрическое сопротивление реостата уменьшается, а частота вращения ротора двигателя увеличивается. После перевода рукоятки на последнюю ступень указатель на рукоятке оказывается в положении против отметки «Работа». При этом сопротивление пускового реостата полностью выведено и обмотка ротора замкнута накоротко.

При пуске двигателей постоянного тока обычно применяют *трехзажимные пусковые реостаты* (рис. В.1, б). Перед пуском двигателя рукоятка Р реостата должна находиться на нулевом неподвижном контакте. После подключения двигателя к сети рукоятку реостата переводят на неподвижный контакт 1 и цепь якоря замыкается. Одновременно через медную шину Ш напряжение подается в параллельную обмотку возбуждения. При этом двигатель возбуждается и его якорь начинает вращение. Постепенно рукоятку реостата поворачивают по часовой стрелке в направлении отметки «Работа» (контакты 2, 3, 4), при котором рукоятка оказывается на не-



подвижном контакте 5, а сопротивление реостата полностью выведенным. В случае двигателя последовательного возбуждения клемма М пускового реостата не используется.

Более совершенен *четырёхзажимный пусковой реостат* типа РЗП (рис. В.1, в). Этот реостат имеет реле максимального тока КА, отключающее двигатель при перегрузке, и реле минимального напряжения КV, отключающий двигатель при чрезмерном понижении напряжения в питающей сети.

При пуске двигателя рукоятку Р реостата переводят с контакта 0 на контакт 1. При этом катушка реле минимального напряжения КV оказывается подключенной к сети, его контакты КV замыкаются, в цепях обмоток якоря (Я1, Я2) и возбуждения (Ш1, Ш2) возникают токи и якорь двигателя приходит во вращение. Рукоятку реостата Р следует постепенно перемещать по часовой стрелке. При этом сопротивление ПР будет уменьшаться. При положении рукоятки на крайнем правом неподвижном контакте пусковой реостат ПР полностью выведен, т. е. его сопротивление равно нулю. На этом период пуска двигателя заканчивается и начинается период его работы.

Если в процессе работы двигатель окажется перегруженным, то сработает реле максимального тока КА. При этом его контакты КА разомкнутся, отключив катушку реле КV от сети. Это приведет к размыканию контактов КV и отключению двигателя. Резистор  $r$  предназначен для ограничения тока в катушке реле КV после срабатывания этого реле и схода рукоятки Р с контакта 1.

Чтобы уменьшить габариты пусковых реостатов, их рассчитывают на кратковременное протекание тока. Поэтому во избежание перегорания резисторов рукоятку ПР не следует долго задерживать на промежуточных контактах. Однако при слишком быстром «перебросе» рукоятки ПР из положения «Пуск» в положение «Работа» ротор (якорь) двигателя не успевает разогнаться до необходимой скорости и пусковой ток может достигнуть недопустимо большого значения.

В рассмотренных конструкциях пусковых реостатов для двигателей постоянного тока (см. рис. В.1, б и в) напряжение на обмотку возбуждения двигателя подается через шину Ш реостата. Благодаря этому при отключении двигателя от сети цепь обмотки возбуждения не размыкается, а оказывается замкнутой на резисторы пускового реостата. При этом энергия магнитного поля, запасенная в обмотке возбуждения, расходуется на нагрев этих резисторов. Если бы пусковые реостаты не имели указанной шины и при отключении двигателя цепь возбуждения размыкалась, то в ней наводилась бы значительная ЭДС самоиндукции, что создавало бы опасность пробоя изоляции этой обмотки и вызывало на размыкающихся контактах значительную электрическую дугу, разрушающую эти контакты.

**Регулировочные устройства.** В цепях возбуждения электрических машин применяются регулировочные реостаты. Эти реостаты могут включаться либо последовательно с обмоткой возбуждения (рис. В.2, а), либо по схеме потенциометра, т. е. делителя напряжения (рис. В.2, б). Сила тока через реостат, включенный по схеме потенциометра,

$$I_p = U_1/r_p + I < I_{\text{доп}}, \quad (\text{В.1})$$

где  $U_1$  — напряжение на зажимах реостата, В;  $r_p$  — сопротивление реостата, Ом;  $I$  — сила тока нагрузки (в обмотке возбуждения М1 — М2), А;  $I_{\text{доп}}$  — допустимый ток в реостате, А.

В лабораториях для исследования обычно применяют электрические машины мощностью 3 — 5 кВт. В цепях возбуждения таких машин широко используют регулировочные реостаты со скользящим контактом (ползунковые проволочные реостаты), в которых подвижный контакт перемещается по неизолированному участку проволоки из сплава с повышенным удельным электрическим сопротивлением, намотанной на керамический цилиндр. Во избежание «пережога» проволочного реостата необходимо следить за тем, чтобы сила тока в нем не превышала допустимого значения (величины электрического сопротивления реостата и допустимого тока указаны на металлической табличке, укрепленной на реостате).

При испытаниях электрических машин большей мощности в качестве регулировочных применяют специальные реостаты возбуждения типа РЗВ, имеющие ступенчатую регулировку сопротивления (рис. В.3).

Трехфазные регулировочные реостаты, используемые для изменения активного сопротивления обмоток фазного ротора асинхронного двигателя, конструктивно не отличаются от трехфазных пусковых реостатов (см. рис. В.1, а), но в отличие от них эти реостаты рассчитаны на продолжительное протекание тока.

При исследовании генераторов в качестве активной электрической нагрузки применяют *нагрузочный реостат*, представляющий собой несколько металлических резисторов или электрических ламп, соединенных параллельно. При этом каждая параллельная ветвь снабжается ключом. Величина нагрузки генератора регули-

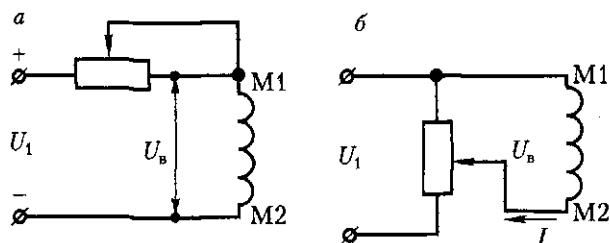


Рис. В.2. Схемы включения регулировочных реостатов

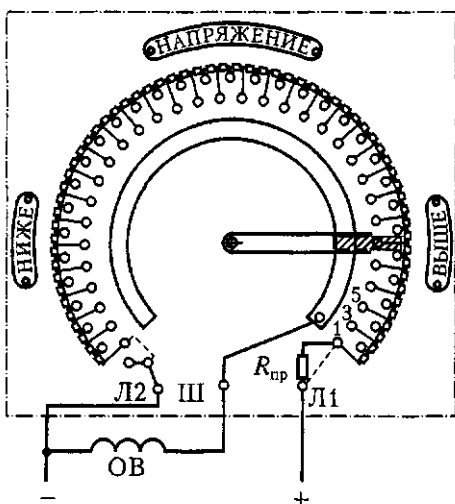


Рис. В.3. Регулирующий реостат типа РЗВ

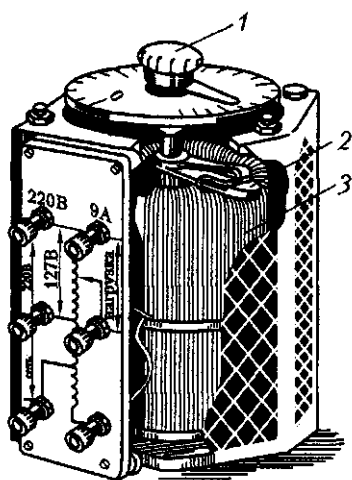


Рис. В.4. Однофазный регулируемый автотрансформатор

руется изменением количества замкнутых ключей: чем их больше, тем больше нагрузка генератора.

В случае трехфазного трансформатора или генератора в качестве активной нагрузки применяют три нагрузочных реостата, соединенных звездой или треугольником.

В цепях переменного тока кроме регулировочных реостатов используют регулировочные автотрансформаторы, позволяющие плавно и в широком диапазоне изменять напряжение на выходе при неизменном напряжении на входе.

В цепях однофазного тока наиболее распространены регулировочные однофазные автотрансформаторы серии РНО и ЛАТР, которые при напряжениях сети 127 или 220 В дают возможность плавно изменять напряжение на выходе от 0 до 250 В. Такой автотрансформатор (рис. В.4) состоит из кольцевого магнитопровода 3, от обмотки которого сделано несколько отводов, позволяющих включать ее на два разных напряжения (127 или 220 В). Торцевая поверхность обмотки очищена от изоляции и по образованной таким образом «дорожке» перемещается угольно-графитовая щетка 2. Регулируется напряжение поворотом рукоятки 1.

В цепях трехфазного тока для плавного регулирования напряжения используют трехфазные регуляторы напряжения серии РНТ, представляющие собой трехфазные автотрансформаторы. Иногда для регулирования трехфазного напряжения пользуются индукционными регуляторами ИР (см. лабораторную работу № 9).

В приводимых ниже принципиальных схемах лабораторных работ для регулирования напряжения переменного тока предполага-

ется включение регулировочных автотрансформаторов серий РНО и РИТ. Если же в лаборатории для регулирования напряжения применяют другие устройства, то в принципиальные схемы лабораторных работ следует внести соответствующие изменения.

#### В.4. Устройства для механической нагрузки электродвигателей

Для механической нагрузки двигателей применяют различного рода тормозные устройства, позволяющие регулировать и одновременно измерять величину нагрузочного (противодействующего) момента на валу двигателя. При исследовании электродвигателей широко используют фрикционные и электромеханические тормозные устройства.

Примером фрикционного тормозного устройства может служить *ленточный тормоз* (рис. В.5, а). Этот тормоз состоит из тормозной ленты 2, охватывающей шкив 1 исследуемого двигателя, двух динамометров 3, винта 6 и штурвала (маховика) 5 с гайкой, навинчиваемой на винт. Тормоз монтируется на стойке 4. Нагрузочный момент  $M_2$  определяют по показаниям  $F_1$  и  $F_2$  динамометров (Н · м):

$$M_2 = 0,5D(F_2 - F_1), \quad (\text{В.2})$$

где  $D$  — диаметр шкива, м.

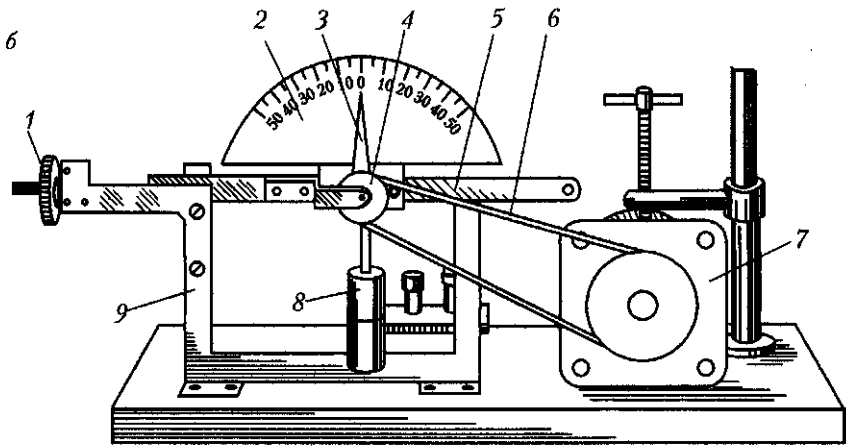
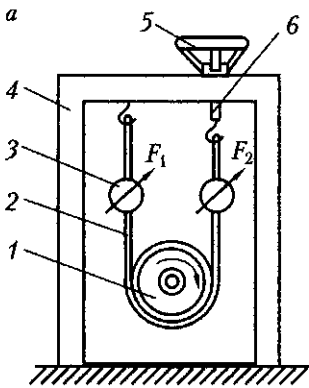
Если шкала динамометров отградуирована в килограммах, то в (В.2) нужно ввести множитель 9,81. Во избежание перегрева ленты шкив во время торможения следует охлаждать водой. Но и в этом случае применение ленточных тормозов возможно лишь при мощности двигателя не более 4 кВт.

Для испытания двигателей малой мощности (не более 40 Вт) предназначен *ленточный тормоз с маятником* (рис. В.5, б). На оси жестко закреплены стрелка 3, шкив 4 и противовес 8. Весь этот узел со шкалой 2 расположен на металлической планке 5, помещенной на стойке 9. Вращением гайки 1 создается натяжение шнура, а за счет сил трения между шнуром 6 и шкивом 7 двигателя шкив 4 тормоза поворачивается на некоторый угол  $\alpha$  до тех пор, пока отклонившийся противовес 8 не уравновесит силу, действующую на шнур со стороны шкива двигателя. Отклонившаяся при этом стрелка тормоза укажет на шкале 2 величину нагрузочного момента. Предельный нагрузочный момент зависит от величины и положения груза противовеса 8 и диаметра шкива двигателя.

Электромеханические тормозные устройства подразделяют на электромагнитные и электродинамические.

*Электромагнитный тормоз* состоит из электромагнита, в магнитном поле которого вращается металлический диск, посаженный на вал исследуемого двигателя. Нагрузочный момент на валу двигате-

Рис. В.5. Ленточные тормоза



ля создается взаимодействием вихревых токов, наведенных во вращающемся диске, с магнитным полем электромагнита. Величина этого момента регулируется изменением силы постоянного тока в обмотке электромагнита.

На рис. В.6 показано устройство электромагнитного тормоза. Электромагнит, состоящий из четырех полюсов 4, с полюсными катушками 3, соединенными последовательно, расположен на одной стороне оси, имеющей возможность поворачиваться в подшипниках, укрепленных в стойке 2, на другой стороне этой оси расположены стрелка 1 и груз 8. При включении двигателя диск 6 (вместе с его валом 7) вращается в магнитном поле электромагнита. При этом в диске наводятся вихревые токи, оказывающие на него тормозящее действие. В результате электромагнитного взаимодействия вращающегося диска с полюсными наконечниками 5 электромагнита ось вместе с электромагнитом и грузом 8 поворачивается на некоторый угол, при котором противодействующий момент, создавае-

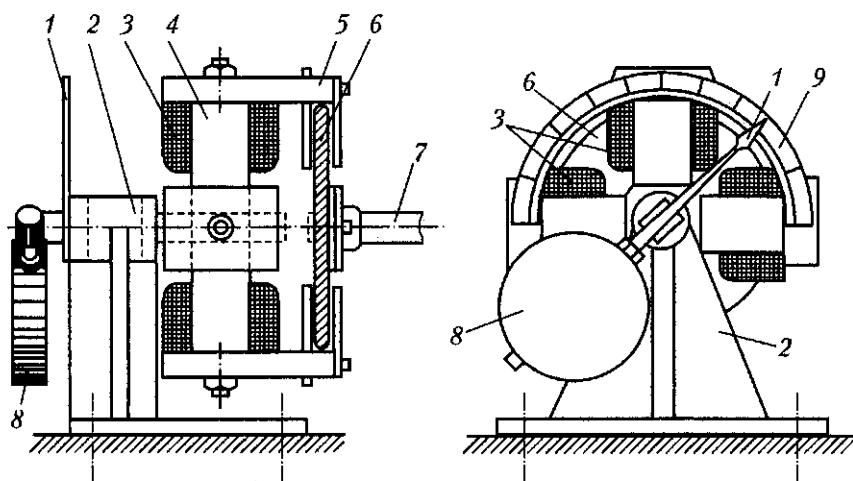


Рис. В.6. Электромагнитный тормоз

мый грузом 8, уравнивает полезный момент двигателя  $M_2$ . На такой же угол отклонится стрелка 1 и укажет на шкале 9 величину нагрузочного момента  $M_2$ .

Количество полюсов в электромагнитном тормозе может быть различным: при небольших нагрузочных моментах их число равно двум, а при значительных — четырем или шести. Диск обычно изготовляют из ферромагнитной стали и лишь в небольших тормозах, применяемых для испытания двигателей небольшой мощности (не более 800 Вт), его делают из алюминия.

Электромагнитные тормоза удобны в эксплуатации, позволяют плавно изменять нагрузку путем регулирования величины тока в обмотке возбуждения электромагнита, дают непосредственный отсчет величины нагрузочного момента по шкале. Кроме того, эти тормоза дают возможность измерить начальный пусковой момент (при напряжениях, допускающих режим короткого замыкания). С этой целью в специальное отверстие в диске вставляют шпильку, которая зацепляется с полюсным наконечником электромагнита. Величину пускового момента отсчитывают по шкале после прекращения качания полюсной системы электромагнита.

*Электродинамический тормоз*, называемый иногда балансирной машиной, представляет собой генератор постоянного тока независимого возбуждения. Подшипниковые щиты такого генератора должны иметь конструкцию, позволяющую установить его в подшипниках на специальных опорах (рис. В.7). На станине 1 укреплено коромысло, одно плечо 2 которого имеет крюк для подвешивания грузов, а другое плечо 3 — стрелку, вставленную между двумя упорами, исключающими вращение статора, но допускающими его по-

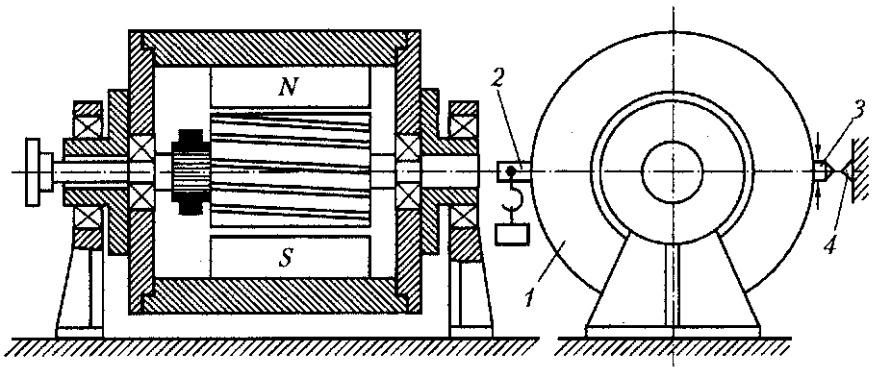


Рис. В.7. Электродинамический тормоз

ворот на некоторый угол. Вал якоря механически соединен с валом исследуемого двигателя муфтой, а выводы обмотки якоря присоединены к нагрузочному сопротивлению. При включении исследуемого двигателя якорь тормоза приводится во вращение и на якоре возникает противодействующий вращению электромагнитный момент. При этом станина испытывает усилие, стремящееся повернуть статор в сторону вращения якоря. Это усилие компенсируется грузом, подвешенным к крюку плеча 2 коромысла, и стрелка на плече 3 коромысла устанавливается против отметки 4. Прежде чем пользоваться электродинамическим тормозом, следует проверить точность балансировки: в неработающем тормозе стрелка плеча 3 коромысла должна располагаться против отметки 4. При необходимости балансировка тормоза выполняется подвешиванием дополнительных грузов к плечу 3 или 2 (в зависимости от вида небаланса).

Момент, действующий на станину тормоза ( $H \cdot m$ ),

$$M_T = 9,81ml, \quad (B.3)$$

где  $m$  — масса груза, кг;  $l$  — длина плеча, м.

Момент на валу исследуемого двигателя

$$M_2 = M_T + \Delta M, \quad (B.4)$$

где  $\Delta M$  — поправка, представляющая собой момент, эквивалентный потерям в тормозе.

Поправка определяется по тарировочным кривым  $\Delta M = f(n)$ , снятым для правого и левого вращения якоря тормоза при разных частотах вращения  $n$ .

Для определения поправки  $\Delta M$  поступают таким образом. Балансирную машину включают в сеть постоянного тока и она работает в режиме двигателя. В этом случае статор испытывает усилие со стороны вращающегося якоря и выходит из нейтрального (уравновешенного) состояния. Тогда, подбирая груз массой  $m_0$  на плече

Укоромысла, возвращают статор в уравновешенное состояние. При этом поправка  $\Delta M$  равна (Н·м):

$$\Delta M = 9,81 m_0 l. \quad (\text{B.5})$$

Поправку определяют для разных частот вращения якоря  $n$ , а затем строят кривую поправок  $\Delta M = f(n)$ , которой пользуются при лабораторном исследовании электродвигателя, нагружаемого электродинамическим тормозом.

Для нагрузки двигателя можно использовать *генератор постоянного тока независимого возбуждения*. Обмотку якоря этого генератора подключают к нагрузочному резистору, а величину тормозящего момента регулируют изменением силы тока в обмотке возбуждения. Измерив напряжение на выходе генератора  $U_r$  и ток в цепи якоря  $I_r$ , определяют нагрузочный момент на валу исследуемого двигателя (Н·м):

$$M_2 = 9,55 I_r U_r / (n \eta_r), \quad (\text{B.6})$$

где  $\eta_r$  — КПД генератора при мощности  $P_r = U_r I_r$ .

Значения  $\eta_r$  для разных  $P_r$  находят после предварительного испытания генератора для определения его КПД во всем диапазоне возможных нагрузок, а затем строят график  $\eta_r = f(P_r)$ , которым пользуются при выполнении лабораторной работы.

## В.5. Измерение электрических величин

Значительное влияние на качество выполняемого эксперимента по исследованию электрических машин и трансформаторов оказывают правильный подбор измерительных приборов и техника измерений. Из большого разнообразия систем электроизмерительных приборов наибольшее распространение в лабораториях электрических машин и электропривода получили магнитоэлектрическая, электромагнитная, электродинамическая и индукционная системы.

**Магнитоэлектрическая система.** Приборы этой системы имеют равномерную шкалу, мало подвержены влиянию внешних магнитных полей. К недостаткам следует отнести чувствительность к перегрузкам и колебаниям температуры.

Амперметры и вольтметры магнитоэлектрической системы применяют в цепях постоянного тока. Обычно одна из клемм прибора обозначена знаком плюс или минус, что необходимо учитывать при включении прибора в сеть. При неправильном включении прибора в сеть стрелка отклоняется влево. В этом случае провода, присоединенные к клеммам, следует поменять местами, предварительно отключив установку от сети.

Для расширения пределов измерения амперметров магнитоэлектрической системы используют *шунты*, представляющие собой ка-



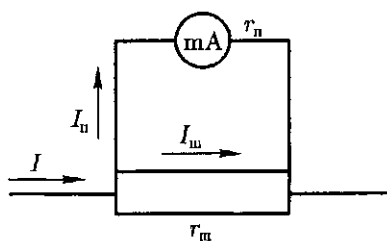


Рис. В.8. Схема включения амперметра постоянного тока с шунтом

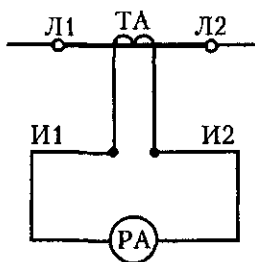


Рис. В.9. Схема включения амперметра переменного тока с измерительным трансформатором тока

либрованные резисторы сопротивлением  $r_{ш}$ , включаемые в разрыв цепи (рис. В.8). Измерительный прибор подключают параллельно шунту. Если шкала амперметра не переградуирована, то измеряемый ток

$$I = I_n(1 + r_n/r_{ш}), \quad (B.7)$$

где  $I_n$  — ток, проходящий через прибор, т. е. показание прибора, А;  $r_n$  и  $r_{ш}$  — электрические сопротивления прибора и шунта, Ом.

**Электромагнитная система.** Приборы этой системы пригодны для измерений как в цепях постоянного, так и переменного токов, но обычно их применяют в цепях переменного тока. Они обладают большой перегрузочной способностью и их чаще всего используют в качестве амперметров и вольтметров. К недостаткам приборов электромагнитной системы следует отнести их чувствительность к внешним магнитным полям и колебаниям частоты переменного тока, а также неравномерность шкалы. Последнее необходимо учитывать при снятии показаний прибора при положении стрелки между делениями.

Для расширения пределов измерения амперметров электромагнитной системы в цепях переменного тока применяют измерительные трансформаторы тока ТА (рис. В.9). Клеммы первичной обмотки этого трансформатора обозначены Л1 и Л2. Этими клеммами трансформатор включают в разрыв цепи, по которой проходит измеряемый ток  $I$ . Амперметр РА подключают к клеммам трансформатора И1 и И2. Вторичная обмотка трансформатора тока рассчитана на ток не более 5 А. Ток в цепи определяют с учетом коэффициента трансформации трансформатора тока

$$I = k_r I_n, \quad (B.8)$$

где  $k_r$  — коэффициент трансформации измерительного трансформатора тока, который указан на корпусе трансформатора.

Если по первичной обмотке трансформатора проходит ток, то вторичную обмотку этого трансформатора нельзя размыкать, ина-

че на выводах этой обмотки возникнет значительное напряжение, опасное для участников эксперимента.

**Электродинамическая система.** Приборы данной системы используют для измерений в цепях постоянного и переменного тока. Обычно амперметры и вольтметры этой системы делают универсальными, т. е. пригодными для измерений как в цепях постоянного, так и переменного тока. Шкала амперметров и вольтметров неравномерная, а ваттметров — практически равномерная. Недостатком системы является чувствительность к перегрузкам и внешним магнитным полям.

В лабораторных приборах высокого класса точности для ослабления влияния внешних магнитных полей применяют экранирование и *астатическое* выполнение прибора. Астатические приборы имеют два одинаковых измерительных элемента, расположенных таким образом, что воздействия внешних магнитных полей на эти элементы взаимно компенсируются.

В некоторых приборах электродинамической системы на шкалу нанесены деления без обозначения их цены. В этом случае, прежде чем производить измерения, необходимо определить цену деления по формулам:

$$C_V = U_{\text{пред}}/N; \quad (\text{В.9})$$

$$C_A = I_{\text{пред}}/N, \quad (\text{В.10})$$

где  $U_{\text{пред}}$  и  $I_{\text{пред}}$  — пределы измерения приборов;  $N$  — число делений шкалы приборов.

Расширение пределов измерения амперметров электродинамической системы в цепях переменного тока осуществляется посредством измерительных трансформаторов тока ТА.

Наибольшее применение в лабораторной практике получили электродинамические приборы в качестве ваттметров (рис. В.10, а). Неподвижную катушку такого ваттметра, изготовленную из провода большого сечения, включают в цепь последовательно (как ам-

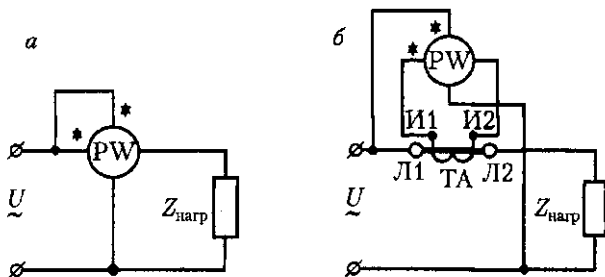


Рис. В.10. Схемы включения ваттметров электродинамической системы: а — непосредственно в сеть; б — через трансформатор тока

перметр), а подвижную катушку, состоящую из провода малого сечения, — параллельно элементу цепи, на котором измеряется потребляемая активная мощность. Для ограничения тока в подвижной катушке последовательно включают добавочный резистор сопротивлением  $r_{доб}$ , располагаемый в корпусе прибора.

Если на шкалу ваттметра нанесены деления без обозначения цены  $C_w$ , то цену деления можно вычислить по формуле

$$C_w = U_{црел} I_{црел} / N. \quad (B.12)$$

Мощность, измеренная ваттметром (показание прибора в Вт),

$$P = C_w N', \quad (B.13)$$

где  $N'$  — число делений, отмеченных стрелкой на шкале прибора.

Применяют ваттметры, рассчитанные на несколько пределов измерения. В этом случае каждому пределу измерения соответствует своя цена деления.

Расширение пределов измерения ваттметров по току осуществляется с помощью измерительных трансформаторов тока ТА (рис. В.10, б). Обычно последовательная (токовая) катушка ваттметра допускает ток не более 5 А. Расширения пределов измерения ваттметра по напряжению в лабораториях электрических машин и электропривода обычно не требуется.

Мощность, измеренную ваттметром, включенным через измерительный трансформатор тока, определяют по формуле

$$P = k_T P', \quad (B.14)$$

где  $P'$  — показание ваттметра, Вт.

Если шкала ваттметра имеет деления без указания их цены, то

$$P = k_T C_w N'. \quad (B.15)$$

Если ток в электрической цепи меньше 1 А, то последовательную катушку ваттметра необходимо включить через повышающий измерительный трансформатор тока ( $k_T < 1$ ). Таким образом, во всех случаях включения ваттметра необходимо, чтобы ток в его токовой катушке был не более 5 А и не менее 1 А.

Одна из клемм последовательной катушки и одна из клемм параллельной катушки отмечены звездочками (\*) или точками (•). Эти клеммы называют *генераторными*. При сборке схемы с применением ваттметра необходимо эти клеммы соединить между собой и включить в цепь со стороны источника питания.

Мощность в трехфазной сети обычно измеряют трехфазным *двух-элементным* ваттметром (см. рис. 1.5). При отсутствии такого ваттметра для этой цели можно использовать два однофазных ваттметра (см. рис. 8.1). Активная мощность трехфазной системы в этом случае равна сумме показаний двух ваттметров:

$$P = P' + P''. \quad (B.16)$$

**Индукционная система.** Приборы этой системы прочны и надежны в работе, но точность их невелика.

Для измерения фазовых сдвигов в цепях переменного тока служат электродинамические фазометры, у которых угол поворота подвижных катушек пропорционален измеряемому углу сдвига фаз между током и напряжением. Кроме того, возможно применение фазометров ферродинамической системы.

Для измерения частоты переменного тока используют частотомеры. Наибольшее применение имеют частотомеры *ферродинамической системы*.

Частотомеры включают в сеть параллельно нагрузке, так же как и вольтметры. Прежде чем включить частотомер в сеть, нужно проверить соответствие напряжения сети номинальному напряжению прибора, указанному на шкале.

У частотомеров *вибрационной системы* чувствительные элементы представляют собой тонкие пластинки, закрепленные одним концом. Каждая пластинка имеет собственную частоту колебаний. Поэтому если вся система пластинок вибрирует с частотой сети, то наибольшая амплитуда колебаний будет у пластины, собственная частота колебаний которой совпадает с вынужденными колебаниями, соответствующими частоте переменного тока в сети. Вибрационные частотомеры чувствительны к внешним толчкам и вибрациям, поэтому в лабораторной практике предпочтительны стрелочные частотомеры.

При выборе электроизмерительных приборов для лабораторного исследования следят за тем, чтобы измеряемая величина соответствовала средней части шкалы, а ее наибольшее значение не превышало предела измерения прибора. Это обеспечит нужную точность измерений.

Необходимо также, чтобы приборы эксплуатировались в их рабочем положении (вертикально, горизонтально, под углом  $60^\circ$  и т. п.). При нарушении последнего требования погрешность измерения становится недопустимо большой.

При снятии показаний стрелочного прибора стрелка должна находиться на уровне глаз наблюдателя. При несоблюдении этого условия возможны ошибки, обусловленные явлением *параллакса*.

При выборе электроизмерительных приборов для исследования устройств небольшой мощности необходимо иметь в виду, что собственное потребление энергии измерительным прибором может оказаться сравнимым с измеряемыми величинами. Это может привести к значительным ошибкам эксперимента. Чтобы избежать этого, следует при исследовании устройств весьма малой мощности применять измерительные приборы специального назначения, у которых собственное потребление намного меньше потребления объекта исследования. Такая необходимость может возникнуть при исследовании электрических машин малой мощности (микро-

машин), например исполнительных двигателей или тахогенераторов.

Для измерения токов до 1А используют полупроводниковые многопредельные амперметры, позволяющие при изменениях тока нагрузки менять предел измерения. Напряжения измеряют вольтметрами PV со значительным внутренним сопротивлением, например электронными вольтметрами.

В лабораториях электрических машин и электропривода получили распространение цифровые измерительные приборы. В этих приборах измеряемая величина преобразуется в комбинацию цифр на отсчетном устройстве в установленных единицах измерения. Цифровые приборы используют в качестве вольтметров, омметров, частотомеров, фазометров и т. д.

## В.6. Измерение частоты вращения электрических машин

Измерение частоты вращения при лабораторных исследованиях электрических машин и электропривода — наиболее ответственный процесс, так как его точность во многом определяет правильность результатов исследования.

В лабораторной практике существует несколько способов измерения частоты вращения, среди которых наиболее распространенными являются способы с применением тахометра, тахогенератора и стробоскопический.

**Измерение частоты вращения тахометром.** Тахометры бывают двух видов — центробежные и часовые. Основным элементом центробежного тахометра (рис. В.11) является центробежный регулятор 3, соединенный с муфтой 4, способной перемещаться вдоль оси 5.

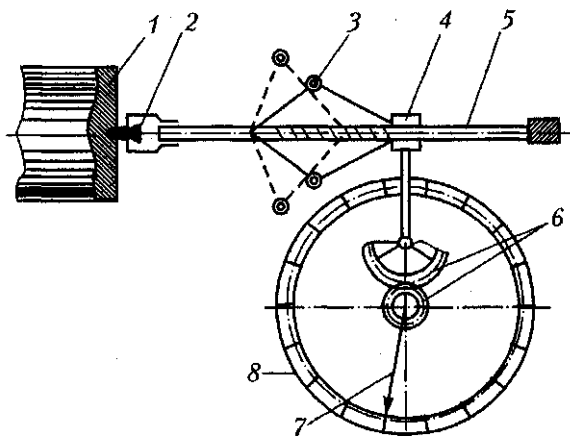


Рис. В.11. Кинематическая схема центробежного тахометра

С помощью зубчатой передачи 6 муфта 4 связана со стрелкой 7, указывающей на шкале 8 частоту вращения оси 5. На конец оси 5 надевается наконечник 2, который, будучи вставленным в выточку вала электрической машины 1, приводит ось 5 во вращение. Тахометры выполняют на несколько пределов измерения. При пользовании тахометром не следует сильно прижимать наконечник 2 к валу машины, так как это вносит погрешность в измерение и ведет к преждевременному износу вращающихся частей тахометра. В то же время слишком слабое прижатие наконечника тахометра к валу машины ведет к значительному проскальзыванию наконечника, что также служит причиной значительной ошибки измерения. Соединять ось тахометра с валом машины нужно только на время снятия показания, так как при длительной работе тахометр быстро выходит из строя. Недостатки центробежного тахометра — механическая нагрузка, влияющая на работу машин небольшой мощности ( $< 1$  кВт).

Тахометры часового типа не создают значительной механической нагрузки на вал машины, поэтому их применяют при исследовании электрических машин мощностью от 50 Вт и более. Такой тахометр состоит из счетного и часового механизмов. При сочленении оси тахометра с валом электрической машины счетный механизм отмечает число оборотов вала машины за определенное время, например за 5 с (это время определено часовым механизмом тахометра). За это время стрелка тахометра отклоняется и указывает на шкале частоту вращения. Для выполнения измерения необходимо сочленить ось тахометра с валом машины, а кнопку «Пуск» нажать и отпустить. При этом включается часовой механизм. По окончании измерения и снятия показания тахометра следует нажать кнопку «Стоп» и стрелка прибора вернется в нулевое положение.

**Измерение частоты вращения тахогенератором.** Тахогенератор — это датчик частоты вращения, с которого снимают электрический сигнал, пропорциональный частоте вращения. Подав этот сигнал на электроизмерительный прибор (вольтметр), шкала которого отградуирована в единицах частоты вращения (об/мин), получаем возможность непрерывно наблюдать за частотой вращения вала исследуемой машины. Обычно тахогенератор устанавливают на подшипниковом щите электрической машины и его вал с помощью эластичной муфты соединяют с валом машины. Однако тахогенераторы можно успешно применять лишь в машинах, для которых эти тахогенераторы не составляют заметной механической нагрузки.

**Измерение частоты вращения стробоскопическим способом.** Это наиболее универсальный способ измерения, а для машин весьма малой мощности ( $< 50$  Вт) этот способ является единственным.

Сущность способа состоит в том, что вращающаяся деталь освещается мигающим с определенной частотой светом неоновой или

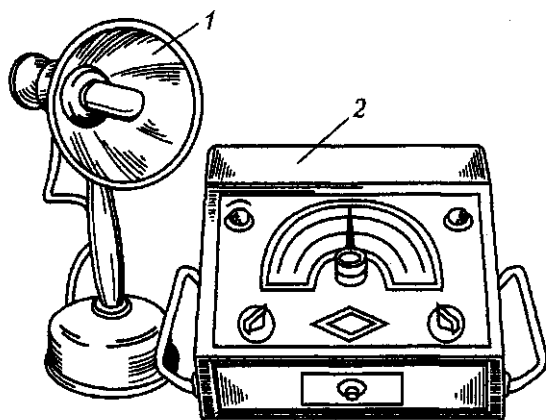


Рис. В.12. Строботахометр типа СТ

ртутной лампы. Если частота вспышек лампы при этом равна частоте вращения детали, то последняя кажется наблюдателю неподвижной. Если же частота вспышек лампы больше частоты вращения детали, то она кажется вращающейся в направлении, встречном направлению действительного вращения, а если частота вспышек меньше частоты вращения, то деталь кажется вращающейся в направлении действительного вращения. Чем меньше разница в частотах вращения детали и мигания лампы, тем медленнее вращающейся кажется эта деталь наблюдателю.

В настоящее время в лабораторной практике широко применяют строботахометры типа СТ (рис. В. 12), состоящие из осветительной неоновой лампы с рефлектором 1, обеспечивающим достаточное освещение вращающейся детали электрической машины, и лампового генератора 2 с регулируемой частотой напряжения на выходе. Ламповый генератор имеет ручки грубой и точной регулировки частоты и стрелку, которая на шкале указывает частоту мигания осветительной лампы (шкала отградуирована в единицах частоты вращения). Свет лампы направляют на вращающуюся деталь машины и, поворачивая ручку настройки частоты генератора, добиваются ярко освещенного неподвижного изображения этой детали. Затем по показанию стрелки на шкале определяют частоту вращения. При пользовании строботахометром необходимо знать ориентировочно измеряемую частоту вращения, чтобы регулятором грубой настройки правильно установить требуемый диапазон. Если же диапазон установлен неправильно, то возможна грубая ошибка при измерении, когда освещаемая неоновой лампой вращающаяся деталь будет казаться неподвижной, но при меньшей освещенности, хотя частота мигания в несколько раз отличается от частоты вращения. Поэтому если ориентировочная частота вращения неиз-

вестна, то следует проделать измерение несколько раз на разных диапазонах, добиваясь каждый раз эффекта неподвижности вращающейся детали. За действительную частоту вращения следует принять частоту, соответствующую наиболее яркой освещенности наблюдаемой детали.

## **В.7. Общие указания по выполнению лабораторных работ**

Лабораторные работы, связанные с исследованием электрических машин, отличаются большим количеством разнообразных измерений как электрических (ток, напряжение, мощность), так и неэлектрических (момент, частота вращения) величин. Кроме того, в ходе экспериментов выполняют различные регулировки и переключения, связанные с пуском машины, изменением частоты вращения, нагрузочного момента и т. п. Поэтому заданная программа лабораторной работы может быть успешно выполнена в отведенное для этого время только при условии тщательной подготовки и продуманных действий всей бригады студентов при выполнении работы. При этом имеется в виду не только проведение экспериментов, но и обработка полученных результатов и составление отчета по лабораторной работе.

Получив разрешение преподавателя, бригада приступает к выполнению лабораторной работы. Вначале необходимо ознакомиться и записать в рабочую тетрадь номинальные данные исследуемого объекта (электрических машин, трансформаторов), а затем выяснить расположение измерительных приборов и пускорегулирующей аппаратуры, предназначенных для выполнения эксперимента. При выборе измерительных приборов необходимо руководствоваться не только соответствием предела измерения прибора наибольшему значению измеряемой величины, но и соответствием системы прибора роду измеряемых токов и напряжений.

Пусковые и регулировочные реостаты, необходимые для выполнения работы, расположены на лабораторном стенде или вблизи него, поэтому следует лишь установить назначение каждого из них.

При сборке схемы целесообразно придерживаться следующего правила: сначала выполнить все соединения в последовательной (главной) цепи, т. е. соединить все элементы схемы, предназначенные для последовательного включения (амперметры, последовательные катушки ваттметров, последовательные обмотки возбуждения машин постоянного тока, фазные обмотки статоров машин переменного тока и т. п.), а затем присоединить элементы схемы параллельного включения (вольтметры, параллельные катушки ваттметров, параллельные обмотки возбуждения машин постоянного тока с регулировочными реостатами и т. п.). Такой прием по-



зволяет сознательно подойти к оценке назначения каждого элемента схемы и тем самым избежать ряда ошибок при сборке схемы, например элемент схемы, предназначенный для последовательного включения, присоединить параллельно, и наоборот.

Если электрическая схема включает в себя большое количество измерительных приборов и регулировочных реостатов, то одновременно со сборкой схемы следует провести маркировку измерительных приборов и регулировочных реостатов (на бумажных или картонных бирках записать обозначение элементов схемы и прикрепить к ним). Эта мера наиболее целесообразна в начальный период работы студентов в лаборатории электрических машин и электропривода.

При сборке схемы нужно по возможности избегать перекрещивания проводов и на один зажим присоединять не более трех проводов. Все соединения проводов должны быть надежными. Следует помнить, что отыскание нарушенного контакта часто отнимает больше времени, чем тщательное присоединение проводов.

После сборки схемы ее проверяют, при этом если сборку схемы выполнял один член бригады, то проверять ее должен другой. При этом необходимо рукоятки пусковых и регулировочных реостатов поставить в положение, соответствующее пуску машины: рукоятку пускового реостата установить на отметке «Пуск», а рукоятки регулировочных реостатов в цепи возбуждения поставить в положение, соответствующее наибольшему значению тока возбуждения у двигателей или наименьшему значению этого тока у генераторов. Если в схеме применен регулировочный автотрансформатор, то его рукоятку следует поставить в нулевое положение. Следует также проверить, стоят ли стрелки измерительных приборов на нулевом делении шкалы. При необходимости их положение следует подкорректировать.

Собранную схему нужно показать преподавателю и только с его разрешения произвести пробное включение лабораторной установки. При этом необходимо обратить внимание на показания приборов. В цепи постоянного тока при использовании измерительного прибора магнитоэлектрической системы возможно отклонение стрелки влево от нуля. В этом случае, отключив установку, следует поменять местами подходящие к прибору провода.

При пробном включении установки необходимо также перемещением ручек регулировочных реостатов проверить, как изменяется регулируемый параметр машины (напряжение на выходе генератора или частота вращения двигателя) и не выходят ли стрелки измерительных приборов за пределы шкалы. Если какой-либо параметр машины не регулируется или прибор «зашкаливает», нужно отключить установку и заменить соответствующий регулировочный реостат или прибор либо изменить условия эксперимента, например увеличить диапазон изменения сопротивления в цепи об-

мотки возбуждения электрической машины. Если же пробное включение показало, что все элементы схемы работают нормально, то можно приступить к проведению эксперимента.

Отчеты по всем измерительным приборам следует вести по возможности одновременно. Для этого между членами бригады должны быть заранее распределены обязанности по снятию показаний измерительных приборов и регулировке параметров. Показания приборов снимают по команде студента, выполняющего регулировку параметров машины.

Нельзя делать перерыва в начатой серии наблюдений. Если появились сомнения в правильности показания какого-либо прибора, то необходимо повторить снятие показаний по всем приборам. Показания записывают в заранее заготовленные таблицы с необходимым количеством граф, в точном соответствии с единицами измерений, указанными на шкале прибора. Никаких пересчетов показаний на другие единицы или же учет коэффициента трансформации измерительного трансформатора тока во время опыта делать не следует. Например, если измерение ведется многопредельным измерительным прибором, то в таблицу записывают показания в количестве делений шкалы, отмеченных стрелкой, без умножения показания на цену деления. Если же этого правила не придерживаться, то вероятность ошибки резко возрастает, а при обнаружении ошибки невозможно определить, когда она допущена — при снятии показаний прибора или при их пересчете.

По окончании эксперимента, не разбирая схемы, выполняют все необходимые расчеты и на заранее заготовленную координатную сетку наносят точки будущих графиков и соединяют их плавной кривой линией. Затем каждый студент должен внимательно проанализировать полученные результаты эксперимента, сравнив их с номинальными данными машины или трансформатора и с основными положениями теории исследуемого устройства, а также проверить реальность полученных результатов. Например, если получено значение коэффициента мощности больше единицы или же значение КПД более 100 %, то это свидетельствует о явной ошибке. Если же результаты эксперимента не вызывают сомнения, то их следует показать преподавателю. В зависимости от достоверности этих результатов преподаватель дает указание либо на повторение эксперимента, либо на переход к следующему.

## **В.8. Обработка результатов эксперимента и оформление отчета по лабораторной работе**

Каждый студент должен самостоятельно обработать результаты выполненных им опытов и составить отчет о проделанной лабораторной работе.

Этот отчет помимо номера и названия лабораторной работы, индекса учебной группы должен содержать следующие сведения: перечень электрических машин, трансформаторов, пускорегулирующей аппаратуры и измерительных приборов с указанием их паспортных данных;

программу лабораторной работы;

электрические схемы соединений;

таблицы с записью результатов проведенных опытов и выполненных вычислений;

расчетные формулы, по которым выполнялись вычисления;

диаграммы и графики зависимостей;

заклучение о проделанной работе.

Все схемы, таблицы и графики, приводимые в отчете, должны иметь наименования, например, «Схема опыта холостого хода трансформатора», «Таблица результатов опыта холостого хода трансформатора», «График зависимости КПД трансформатора от нагрузки при  $\cos \varphi_2 = 1$ ». Элементы электрических схем должны изображаться и обозначаться в соответствии с действующим стандартом (см. прил. 1 и 2).

При выполнении расчетов рекомендуется пользоваться калькуляторами. Схемы соединений и таблицы следует выполнять карандашом с помощью линейки с обязательным соблюдением требований на условные изображения и обозначения элементов схем и единиц измерения.

Особое внимание необходимо уделить выполнению графиков зависимостей. Их следует вычерчивать по координатным сеткам, желательнее на миллиметровой бумаге размером не менее  $100 \times 100$  мм. По координатным осям наносят деления с одинаковыми интервалами, соответствующие откладываемым значениям в принятых единицах измерения. У каждой координатной оси должны быть указаны условное буквенное обозначение откладываемой величины и единица ее измерения. Если величины на координатных осях отложены в определенном масштабе с указанием числовых отметок, то на концах этих осей стрелок ставить не следует.

Если в одних координатных осях строится несколько графиков, представляющих собой функциональные зависимости ряда величин от одной независимой переменной (например, рабочие характеристики двигателя), то параллельно основной оси ординат, пересечение которой с осью абсцисс принято за начало координатных осей, проводят дополнительные оси ординат, каждую со своим масштабом и своими единицами измерения. За начало координат всех величин в этом случае принимают точку пересечения основных осей. При построении точек по результатам опытов на таком совмещенном графике эти точки во избежание ошибок следует отмечать разными условными значками — крестиками, кружочками и т. п.

После нанесения точек какого-либо графика их соединяют плавной кривой с помощью лекала. При этом возможен «разброс» точек, т.е. некоторые из этих точек не будут лежать на кривой. Это объясняется возможными погрешностями экспериментов: неточным снятием показания измерительного прибора, случайными колебаниями напряжения в сети, приближенностью вычислений и т.п. Если «разброс» точек оказался значительным, то опыт следует повторить. Для построения криволинейного графика необходимо иметь не менее пяти точек.

В последнем разделе отчета, в заключении о проделанной работе, студент должен дать оценку эксплуатационным свойствам объекта исследования, соответствие этих свойств паспортным данным этого объекта, подтвердились ли экспериментально теоретические сведения и т.п.

Отчет в целом должен быть лаконичным, но так, чтобы его содержание было понятным без дополнительных устных пояснений. Объем отчета не должен превышать четырех страниц формата А4 (см. прил. 3).

# Раздел первый

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

### Глава 1

#### ТРАНСФОРМАТОРЫ

##### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

#### Исследование силового трансформатора методом холостого хода и короткого замыкания

**Цель работы.** Ознакомиться с устройством трансформатора; усвоить практические приемы лабораторного исследования трансформатора методом холостого хода и короткого замыкания.

#### Программа работы

1. Ознакомиться с устройством трансформатора; записать его паспортные данные, а также данные измерительных приборов и регулятора напряжения.
2. Собрать схему опыта холостого хода трансформатора и после проверки ее преподавателем выполнить опыт холостого хода.
3. Собрать схему опыта короткого замыкания трансформатора и после проверки ее преподавателем выполнить опыт короткого замыкания.
4. Используя результаты опытов холостого хода и короткого замыкания, построить внешние характеристики трансформатора при коэффициентах мощности нагрузки  $\cos \varphi_2 = 1$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$ .
5. Используя результаты опытов холостого хода и короткого замыкания, построить графики зависимостей КПД трансформатора от нагрузки при  $\cos \varphi_2 = 0,8$  и  $\cos \varphi_2 = 1$  и определить нагрузку трансформатора, соответствующую максимальному значению КПД.
6. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

#### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал [5]: принцип действия и устройство силового трансформатора, уравнения ЭДС, МДС и токов, схему замещения трансформатора; трехфазный трансформатор; опыты холостого хода и короткого замыкания, потери и КПД; внешние характеристики трансформатора.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

### Порядок выполнения работы

По указанию преподавателя лабораторную работу выполняют на однофазном или трехфазном трансформаторе.

**Однофазный трансформатор. Опыт холостого хода.** В схеме включения однофазного трансформатора при опыте холостого хода (рис. 1.1) применены следующие устройства:

автоматический выключатель QF;

регулятор напряжения РНО, позволяющий плавно регулировать подводимое к первичной обмотке трансформатора напряжение;

измерительные приборы — амперметр PA; ваттметр PW; два вольтметра PV1 и PV2.

В качестве первичной обмотки используют обмотку низшего напряжения НН. Всего делают не менее пяти замеров через приблизительно одинаковые интервалы тока холостого хода, изменяя подводимое к трансформатору напряжение от  $0,5 U_{1ном}$  до  $1,15 U_{1ном}$ . Показания измерительных приборов заносят в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Номер измерения и вычисления	Измерения				Вычисления		
	$U_1$ , В	$I_0$ , А	$P_0$ , Вт	$U_{20}$ , В	$i_0$ , %	$\cos \varphi_0$	$k$

Затем рассчитывают ток холостого хода в % от номинального первичного тока:

$$i_0 = (I_0 / I_{1ном}) 100; \quad (1.1)$$

коэффициент мощности в режиме холостого хода

$$\cos \varphi_0 = P_0 / (U_1 I_0); \quad (1.2)$$

коэффициент трансформации (так как при опыте холостого хода первичной является обмотка НН, то коэффициент трансформации определяют отношением вторичного напряжения  $U_{20}$  к первичному  $U_1$ )

$$k = U_{20} / U_1. \quad (1.3)$$

Полученные значения заносят в табл. 1.1. Величины, соот-

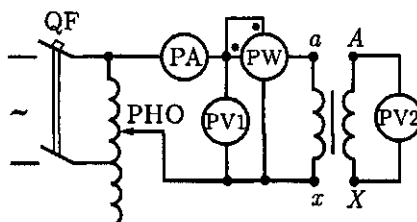


Рис. 1.1. Схема включения однофазного трансформатора при опыте холостого хода

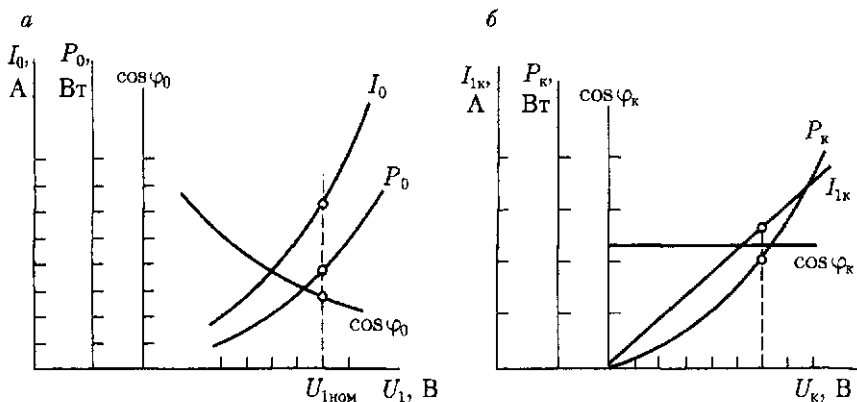


Рис. 1.2. Характеристики холостого хода (а) и короткого замыкания (б) трансформатора

ветствующие номинальному первичному напряжению  $U_{1ном}$ , следует выделить, например, подчеркнув их. По данным таблицы строят характеристики холостого хода трансформатора (на общей координатной сетке):  $I_0, P_0, \cos \varphi_0 = f(U_1)$ .

На характеристиках отмечают точки  $I_{0ном}$ ,  $P_{0ном}$  и  $\cos \varphi_{0ном}$ , соответствующие номинальному напряжению  $U_{1ном}$  (рис. 1.2, а).

*Опыт короткого замыкания.* При опыте короткого замыкания трансформатора (рис. 1.3) напряжение обычно подводят к обмотке ВН, номинальное значение тока в которой меньше, чем в обмотке НН. В некоторых случаях это позволяет включать ваттметр в первичную цепь без трансформатора тока. Вторичную обмотку трансформатора замыкают накоротко медным проводом достаточного поперечного сечения, чтобы не создавать во вторичной цепи трансформатора значительного электрического сопротивления.

Опыт короткого замыкания проводят в такой последовательности: устанавливают рукоятку РНО на нулевую отметку, а затем,

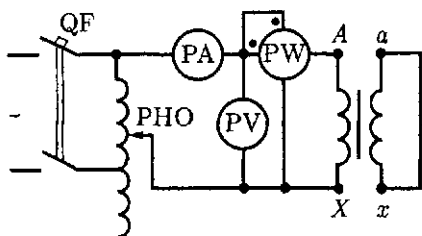


Рис. 1.3. Схема включения однофазного трансформатора при опыте короткого замыкания

включив рубильник, медленно посредством РНО повышают напряжение, изменяя значение тока короткого замыкания от 0 до  $1,2I_{1ном}$ . Показания измерительных приборов ( $U_k, I_{1к}$  и  $P_k$ ), снятые через приблизительно одинаковые интервалы тока короткого замыкания, а также результаты вычислений заносят в табл. 1.2. Значения величин, соответствующих току  $I_{1к} = I_{1ном}$ , подчеркивают.

Таблица 1.2

Номер измерения и вычисления	Измерения			Вычисления	
	$U_k$ , В	$I_{k1}$ , А	$P_k$ , Вт	$u_0$ , %	$\cos \varphi_k$

Затем рассчитывают напряжение короткого замыкания в % от номинального первичного напряжения

$$u_k = (U_k / U_{1ном}) 100; \quad (1.4)$$

коэффициент мощности при опыте короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = P_k / (U_k / I_k). \quad (1.5)$$

По данным таблицы строят характеристики короткого замыкания (на общей координатной сетке):  $I_k$ ;  $P_k$ ;  $\cos \varphi_k = f(U_k)$ . На характеристиках отмечают точки  $U_{k,ном}$ ,  $P_{k,ном}$ , соответствующие току короткого замыкания  $I_{k1} = I_{k,ном}$  (см. рис. 1.2, б).

Полученные из опыта короткого замыкания значения  $P_{k,ном}$  и  $U_{k,ном}$  следует привести к рабочей температуре 75 °С.

Приведенное к рабочей температуре значение активной мощности короткого замыкания (Вт)

$$P'_{k,ном} = P_{k,ном} [1 + \alpha(75 - \theta_1)], \quad (1.6)$$

где  $\alpha = 0,004$  — температурный коэффициент сопротивления для меди и алюминия;  $\theta_1$  — температура обмоток трансформатора при проведении опыта, °С.

В связи с тем, что температура обмоток трансформатора влияет лишь на активную составляющую напряжения короткого замыкания

$$u_{ка} = u_{k,ном} \cos \varphi_k, \quad (1.7)$$

то и приводить к рабочей температуре следует лишь активную составляющую напряжения короткого замыкания

$$u'_{ка} = u_{ка} [1 + \alpha(75 - \theta_1)]. \quad (1.8)$$

Приведенное к рабочей температуре напряжение короткого замыкания

$$u'_{k,ном} = \sqrt{u'^2_{ка} + u^2_{к,р}}, \quad (1.9)$$

где

$$u_{к,р} = \sqrt{u^2_{k,ном} - u^2_{ка}} \quad (1.10)$$

— реактивная составляющая напряжения короткого замыкания.

**Внешние характеристики.** С увеличением нагрузки трансформатора напряжение на клеммах его вторичной обмотки изменяет-



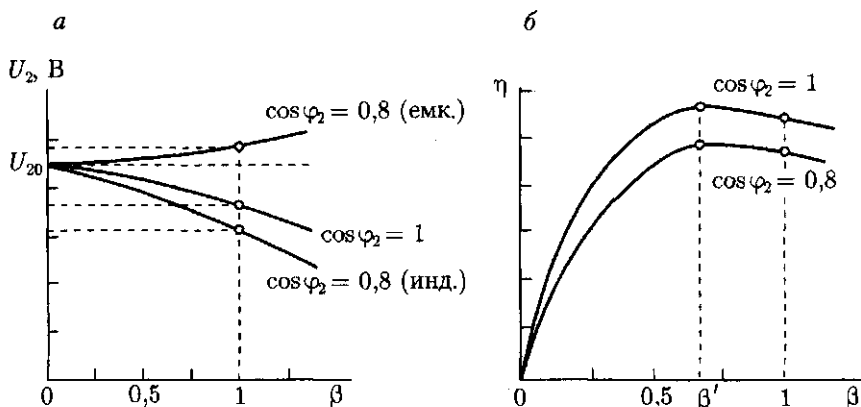


Рис. 1.4. Внешние характеристики (а) и графики зависимости КПД трансформатора от нагрузки (б)

ся. Зависимость этого напряжения от нагрузки выражается графически внешними характеристиками трансформатора  $U_2 = f(I_2)$ . Вид внешней характеристики зависит от характера нагрузки и коэффициента мощности  $\cos \varphi_2$ : при активной и активно-индуктивной нагрузках внешние характеристики имеют падающий вид, причем чем меньше коэффициент мощности  $\cos \varphi_2$ , тем больше наклон характеристики к оси абсцисс; при активно-емкостной нагрузке внешняя характеристика имеет восходящий вид (рис. 1.4, а).

При любой нагрузке напряжение на клеммах вторичной обмотки трансформатора равно

$$U_2 = U_{20}(1 - 0,01\Delta U), \quad (1.11)$$

где  $U_{20} = U_{2\text{ном}}$  — напряжение на вторичной обмотке в режиме холостого хода, принимаемое за номинальное напряжение на выходе трансформатора, В;  $\Delta U$  — изменение вторичного напряжения, вызванное влиянием нагрузки трансформатора, %.

Для построения внешней характеристики трансформатора необходимо рассчитать не менее пяти значений вторичного напряжения  $U_2$  при разных значениях коэффициента нагрузки  $\beta = I_2/I_{2\text{ном}}$ , например при  $\beta = 0,25; 0,50; 0,75; 1,0$  и  $1,2$ .

Расчет  $\Delta U$  ведут по формуле (%)

$$\Delta U = \beta u'_k (\cos \varphi_k \cos \varphi_2 + \sin \varphi_k \sin \varphi_2). \quad (1.12)$$

Расчеты  $\Delta U$  выполняют три раза: при  $\cos \varphi_2 = 1,0$ ,  $\cos \varphi_2 = 0,8$  (нагрузка активно-индуктивная) и  $\cos \varphi_2 = 0,8$  (нагрузка активно-емкостная). В последнем случае получают отрицательные значения  $\Delta U$ . Результаты вычислений заносят в табл. 1.3 и строят на общей координатной сетке три внешние характеристики. Проведя ординату при  $\beta = 1,0$  (номинальная нагрузка), отмечают на характерис-

Таблица 1.3

$\beta$	$\cos \varphi_2 = 1,0$		$\cos \varphi_2 = 0,8$ (инд.)		$\cos \varphi_2 = 0,8$ (емк.)	
	$\Delta U, \%$	$U_2, \text{В}$	$\Delta U, \%$	$U_2, \text{В}$	$\Delta U, \%$	$U_2, \text{В}$

тиках напряжения, соответствующие номинальной нагрузке трансформатора (рис. 1.4, а).

**Зависимость КПД трансформатора от нагрузки.** Для построения графика  $\eta = f(\beta)$  при  $\cos \varphi_2 = 1,0$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$  определяют КПД трансформатора для ряда значений коэффициента нагрузки  $\beta$ , равного 0,25; 0,5; 0,75; 1,0 и 1,2, воспользовавшись для этого выражением

$$\eta = 1 - \frac{P_{0\text{ном}} + \beta^2 P_{\text{к.ном}}}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_{0\text{ном}} + \beta^2 P_{\text{к.ном}}}, \quad (1.13)$$

где  $S_{\text{ном}}$  — номинальная мощность трансформатора, В · А.

Результаты вычислений заносят в табл. 1.4.

Таблица 1.4

$\beta$		0,25	0,5	0,75	1,0	1,2
КПД	$\cos \varphi_2 = 1,0$					
	$\cos \varphi_2 = 0,8$					

По этим данным строят графики КПД (рис. 1.4, б).

Максимальное значение КПД трансформатора соответствует нагрузке, при которой электрические потери трансформатора равны магнитным потерям. Коэффициент нагрузки, соответствующий максимальному значению КПД,

$$\beta' = \sqrt{P_{0\text{ном}} / P_{\text{к.ном}}}. \quad (1.14)$$

На оси абсцисс отмечают значение  $\beta'$  и, проведя в этой точке ординату, определяют максимальные значения КПД. Эти значения можно получить по (1.13), подставив в это выражение  $\beta'$ :

$$\eta_{\text{max}} = 1 - \frac{P_{0\text{ном}}}{0,5\beta' S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_{0\text{ном}}}. \quad (1.15)$$

**Трехфазный трансформатор. Опыт холостого хода.** В схеме опыта холостого хода (рис. 1.5, а) для плавного регулирования напряжения применен трехфазный регулятор напряжения РНТ. Под-

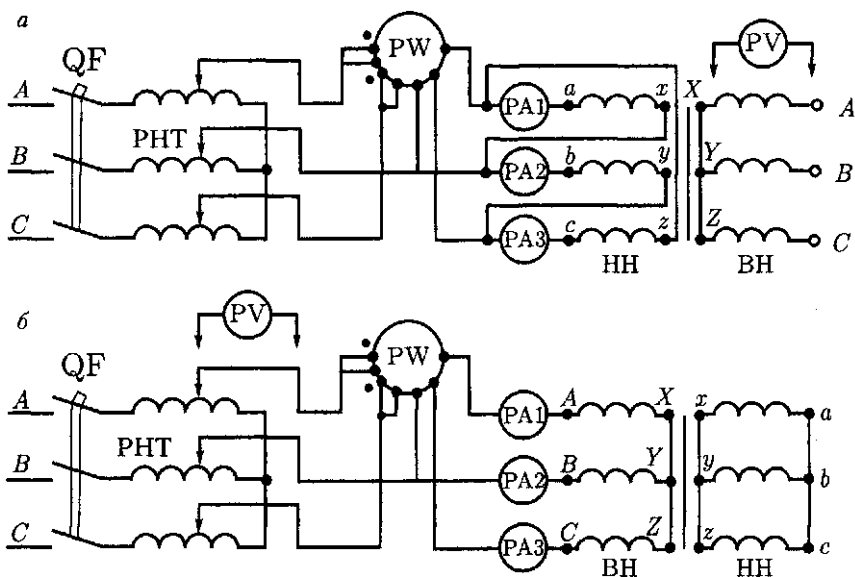


Рис. 1.5. Схемы включения трехфазных трансформаторов при опытах холостого хода (а) и короткого замыкания (б)

водимое к первичной обмотке напряжение (сторона НН) следует изменять от  $0,5 U_{\text{НОМ}}$  до  $1,2 U_{\text{НОМ}}$  и приблизительно через одинаковые интервалы тока холостого хода снять показания измерительных приборов и занести их в табл. 1.5. При этом измеряют фазные значения напряжений, прикладывая концы соединительных проводов вольтметра PV к началу и концу каждой фазной обмотки трансформатора. Если ток холостого хода превышает 5 А, то последовательные катушки двухэлементного ваттметра PW необходимо включить через измерительные трансформаторы тока (рис. 1.6). Далее выполняют расчеты:

$$U_1 = (U_a + U_b + U_c)/3; \quad (1.16)$$

$$U_{20} = (U_{A0} + U_{B0} + U_{C0})/3; \quad (1.17)$$

Таблица 1.5

Номер измерения и вычисления	Измерения									Вычисления						
	$U_a, \text{В}$	$U_b, \text{В}$	$U_c, \text{В}$	$U_{A0}, \text{В}$	$U_{B0}, \text{В}$	$U_{C0}, \text{В}$	$I_{0a}, \text{А}$	$I_{0b}, \text{А}$	$I_{0c}, \text{А}$	$P_0, \text{Вт}$	$U_1, \text{В}$	$U_{20}, \text{В}$	$I_0, \text{А}$	$i_0, \%$	$\cos \varphi_0$	$k$

$$I_0 = (I_{0a} + I_{0b} + I_{0c})/3; \quad (1.18)$$

$$i_0 = (I_0/I_{ном})100; \quad (1.19)$$

$$\cos \varphi_0 = P_0/(3U_1I_0). \quad (1.20)$$

Коэффициент трансформации трехфазного трансформатора определяют как отношение числа витков обмотки ВН к числу витков обмотки НН, равное отношению напряжений (1.3):  $k = U_{20}/U_{1ном}$ . Если значения коэффициентов трансформации при разных напряжениях  $U_1$  неодинаковы, то за коэффициент трансформации следует принять среднее значение:

$$k = (k_1 + k_2 + \dots)/n, \quad (1.21)$$

где  $n$  — число измерений при опыте холостого хода.

При расчете коэффициента трансформации линейных напряжений  $k_L$  необходимо учесть схему соединения обмоток трансформатора. Например, для схемы изображена на рис. 1.5, а,

$$k_L = \sqrt{3}w_A/w_a = \sqrt{3}U_{20}/U_{1ном}$$

Результаты вычислений заносят в табл. 1.5 и строят характеристики холостого хода трансформатора (на общей координатной сетке):  $i_0$ ;  $P_0$ ;  $\cos \varphi_0 = f(U_1)$ . На этих характеристиках отмечают точки  $i_{0ном}$ ;  $P_{0ном}$  и  $\cos \varphi_{0ном}$ , соответствующие номинальному напряжению  $U_{1ном}$  (см. рис. 1.2, а).

**Опыт короткого замыкания.** При опыте короткого замыкания (рис. 1.5, б) в качестве первичной используют обмотку ВН, а обмотку НН замыкают медными проводами небольшой длины достаточного поперечного сечения, чтобы не создавать во вторичной цепи трансформатора заметного сопротивления.

Перед включением рубильника необходимо выставить на регуляторе РНТ нулевое напряжение. Затем, включив автомат QF, медленно повышать напряжение на выходе РНТ и довести ток короткого замыкания  $I_{1к}$  до значения  $1,2I_{1к}$ .

Показания измерительных приборов, снятые через приблизительно одинаковые интервалы тока короткого замыкания, а также результаты вычислений заносят в табл. 1.6, где выделяют значения величин, соответствующих номинальному значению тока короткого замыкания. Если ток короткого замыкания превышает 5 А, то последовательные катушки двухэлементного ваттметра следует включить через измерительные трансформаторы тока (см. рис. 1.6).

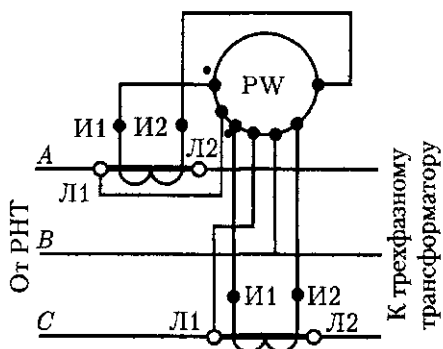


Рис. 1.6. Включение двухэлементного ваттметра через измерительные трансформаторы тока

Таблица 1.6

Номер измерения и вычисления	Измерения							Вычисления			
	$U_{AK}$ В	$U_{BK}$ В	$U_{CK}$ В	$I_{AK}$ А	$I_{BK}$ А	$I_{CK}$ А	$P_K$ Вт	$U_K$ В	$I_K$ А	$u_K$ %	$\cos \varphi_K$

Затем выполняют расчеты по формулам:

$$U_K = (U_{AK} + U_{BK} + U_{CK})/3; \quad (1.22)$$

$$I_K = (I_{AK} + I_{BK} + I_{CK})/3; \quad (1.23)$$

$$u_K = (U_K/U_{ном})100; \quad (1.24)$$

$$\cos \varphi_K = P_K/(3I_K U_K). \quad (1.25)$$

Результаты расчетов также заносят в табл. 1.6. По данным этой таблицы строят характеристики короткого замыкания трансформатора (см. рис. 1.2, б). На этих характеристиках отмечают точки, соответствующие номинальному значению тока короткого замыкания. Значения  $P_{кном}$  и  $u_{к.ном}$  необходимо привести к рабочей температуре 75 °С [см. (1.6) – (1.10)].

Затем строят внешние характеристики и графики зависимости КПД от нагрузки (см. рис. 1.4).

### Анализ результатов лабораторной работы

1. При анализе характеристик холостого хода трансформатора следует обратить внимание на их криволинейность, обусловленную магнитным насыщением магнитопровода, наступающим при некотором значении первичного напряжения  $U_1$ . Ток холостого хода  $I_{0ном}$  и мощность холостого хода  $P_{0ном}$ , полученные опытным путем, сравнивают с их значениями по каталогу на исследуемый трансформатор. Значительное превышение опытных значений над каталожными указывает на наличие дефектов в трансформаторе: короткого замыкания между частью пластин в магнитопроводе или межвитковое короткое замыкание в небольшой части витков какой-либо из обмоток.

Если исследованию подвергался трехфазный силовой трансформатор, то необходимо объяснить причину неравенства токов холостого хода в его фазных обмотках.

2. При анализе характеристик короткого замыкания следует обратить внимание на прямолинейность графика тока короткого замыкания, обусловленную ненасыщенным состоянием магнитопровода при опыте короткого замыкания из-за малой величины основного магнитного потока, которое пропорционально подведенному

к обмотке напряжению короткого замыкания (в трансформаторах средней и большой мощности  $u_k < 10\%$ ).

3. При анализе внешних характеристик трансформатора необходимо сделать вывод о влиянии характера нагрузки на изменение вторичного напряжения трансформатора.

4. При анализе зависимости КПД трансформатора от нагрузки следует объяснить форму этих графиков. Опытное значение КПД сравнивают с данными каталога. Необходимо объяснить причину снижения КПД трансформатора при уменьшении коэффициента мощности нагрузки.

### **Контрольные вопросы**

1. Объясните устройство и принцип действия трансформатора.
2. Что такое коэффициент трансформации и как его определить опытным путем?
3. Почему токи холостого хода в обмотках трехфазного трансформатора не одинаковы?
4. Почему с увеличением первичного напряжения при опыте холостого хода уменьшается коэффициент мощности трансформатора?
5. Почему мощность холостого хода принимают за магнитные потери, а мощность короткого замыкания — за электрические потери?
6. Почему при опыте короткого замыкания ток в первичной обмотке достигает номинального значения при напряжении, в несколько раз меньшем номинального?
7. Определите, на сколько процентов возрастают магнитные потери в исследованном вами трансформаторе при увеличении первичного напряжения на 10 % сверх номинального.
8. Почему при нагрузке  $\beta > \beta'$  КПД трансформатора уменьшается?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2**

### **Опытное определение групп соединения трехфазного трансформатора**

**Цель работы.** Экспериментально подтвердить теоретические сведения о группах соединения трансформаторов и приобрести практические навыки по опытному определению групп соединения трехфазных трансформаторов.

#### **Программа работы**

1. Ознакомиться с устройством трансформатора, записать его паспортные данные, а также данные фазометра\* и вольтметра.

---

\* Фазометр должен иметь полную шкалу ( $360^\circ$ ), но допускается также применение фазометра с неполной шкалой при наличии у него переключателя для измерения положительных и отрицательных углов.

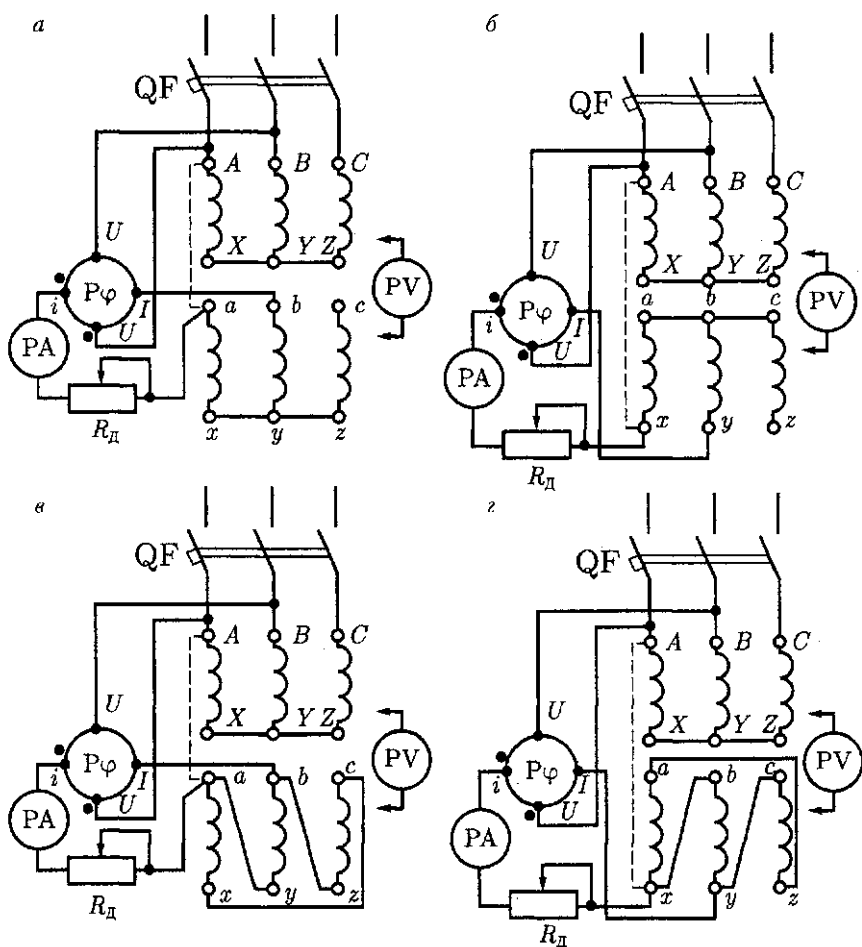


Рис. 2.1. Схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора для опытного определения групп соединения

2. Собрать схему, изображенную на рис. 2.1, *а*, и экспериментально определить группу соединения трансформатора методами фазометра и вольтметра; таким же образом определить группы соединения при включении трансформаторов по схемам, показанным на рис. 2.1, *б*, *в* и *г*.

3. Построить топографические диаграммы линейных напряжений для четырех групп соединения, соответствующих схемам, представленным на рис. 2.1; по ним определить напряжение между точками диаграммы *в* и *В* и сравнить его с напряжением  $U_{bB}$  между зажимами трансформатора *в* и *В*, измеренным вольтметром.

4. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

## Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал [5]: схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов; влияние схемы соединения на отношение линейных напряжений; группы соединения трансформаторов — основные и производные; группы соединения, предусмотренные действующим стандартом.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицу для занесения результатов лабораторной работы.

## Порядок выполнения работы

**Определение группы соединения.** При опытном определении группы соединения трансформаторов наибольшее применение получили два метода:

*метод фазометра*, основанный на непосредственном измерении угла фазового сдвига между соответствующими линейными напряжениями обмоток ВН и НН;

*метод вольтметра*, основанный на измерении напряжений между выводами обмоток ВН и НН с последующим сравнением этих напряжений с напряжениями, полученными в результате расчетов.

В данной работе воспользуемся обоими методами — сначала методом фазометра, а затем методом вольтметра.

Собрав схему, показанную на рис. 2.1, а, после проверки ее преподавателем включают автомат QF и посредством фазометра Pφ измеряют угол α фазового сдвига между линейными напряжениями  $U_{AB}$  и  $U_{ab}$  (метод фазометра). Следует иметь в виду, что фазометр Pφ должен иметь полную ( $360^\circ$ ) шкалу измерения, а резистор  $R_d$  должен иметь сопротивление, при котором ток в последовательной катушке фазометра составлял 2 — 4 А, что фиксируется амперметром РА. Затем соединяют проводом клеммы А и а (пунктирная линия на рисунке) и вольтметром PV измеряют напряжения  $U_{bB}$  и  $U_{cC}$  (метод вольтметра), которые должны быть одинаковыми и равными значению

$$U_{bB} = U_{cC} = U_{ab}(k_L - 1), \quad (2.1)$$

где

$$k_L = U_{AB}/U_{ab}. \quad (2.2)$$

Результаты измерений и вычислений заносят в табл. 2.1.

**Построение топографической диаграммы.** Выбрав масштаб напряжения  $m_U$  (В/мм), строят топографическую диаграмму линейных напряжений, соответствующих схеме рис. 2.1, а, с учетом измеренного угла φ фазового сдвига между векторами линейных напряжений  $U_{AB}$  и  $U_{ab}$  (рис. 2.2, а).



Таблица 2.1

Схемы соединения обмоток	Измерения					Вычисления		Топографическая диаграмма	Группа соединения
	$U_{AB}, В$	$U_{ab}, В$	$\varphi, \text{град}$	$U_{bB}, В$	$U_{cC}, В$	$k_L$	$U_{bB} = U_{cC}, В$		
Рис. 2.1, а								Рис. 2.2, а	
Рис. 2.1, б								Рис. 2.2, б	
Рис. 2.1, в								Рис. 2.2, в	
Рис. 2.1, г								Рис. 2.2, г	

Измерив расстояния между точками диаграммы  $B-b$  и  $C-c$ , определяют напряжения

$$U_{bB} = \overline{Bb} \cdot m_U; \quad U_{cC} = \overline{Cc} \cdot m_U. \quad (2.3)$$

Полученные по (2.3) напряжения должны быть одинаковыми и равными измеренным и вычисленным по (2.1) значениям напряжений, что будет свидетельствовать о правильно выполненных измерениях, вычислениях и построениях.

При опытном определении групп соединения, соответствующих схемам рис. 2.1, б, в и г, и построению топографических диаграмм (рис. 2.2) следует придерживаться изложенного порядка для схемы по рис. 2.1, а, но при вычислении напряжений  $U_{bB}$  и  $U_{cC}$  необходимо пользоваться формулами:

рис. 2.1, б

$$U_{bB} = U_{cC} = U_{xy} (k_L + 1); \quad (2.4)$$

рис. 2.1, в

$$U_{bB} = U_{cC} = U_{ab} \sqrt{1 - \sqrt{3}k_L + k_L^2} \quad (2.5)$$

рис. 2.1, г

$$U_{bB} = U_{cC} = U_{xy} \sqrt{1 + \sqrt{3}k_L + k_L^2} \quad (2.6)$$

Результаты измерений и вычислений заносят в табл. 2.1.

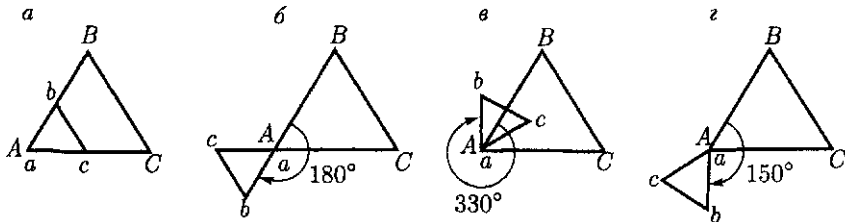


Рис. 2.2. Топографические диаграммы линейных напряжений нулевой (а), шестой (б), одиннадцатой (в) и пятой (г) групп соединений

## Анализ результатов лабораторной работы

При анализе результатов лабораторной работы необходимо иметь в виду следующее:

1. Группы соединения трансформаторов определяются не только схемой соединения обмоток ВН и НН, но и маркировкой их выводов (направлением намотки).

2. Исследованные в лабораторной работе четыре группы соединения являются основными и каждая из них может быть преобразована в две производные группы соединения путем круговой перемаркировки выводов обмоток либо на стороне ВН, либо на стороне НН; следует указать, какие производные группы соединения могут быть получены из каждой основной.

3. Необходимо отметить, какие из групп соединения, рассмотренных в данной работе, предусмотрены стандартом.

### Контрольные вопросы

1. Чем определяется группа соединения трансформатора?
2. Какие группы соединения могут быть получены при одинаковой схеме соединения обмоток ВН и НН?
3. Какие группы соединения называют основными, а какие — производными?
4. Каким образом из основных групп соединения можно получить производные?
5. Перечислите группы соединения, предусмотренные стандартом, нарисуйте соответствующие им схемы соединения обмоток и топографические диаграммы.
6. В чем состоит метод фазометра при определении группы соединения трансформатора?
7. С какой целью при определении группы соединения по методу вольтметра соединяют выводы  $A - a$  (см. рис. 2.1,  $a$ )?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### Исследование параллельной работы трехфазных трансформаторов

**Цель работы.** Изучение условий включения трансформаторов на параллельную работу и принципа распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами; приобретение практических навыков по включению трехфазных трансформаторов на параллельную работу; получение подтверждения теоретическим сведениям о распределении нагрузки между трансформаторами, включенными на параллельную работу.

## Программа работы

1. Ознакомиться с конструкцией трансформаторов, дросселя и нагрузочного устройства; записать паспортные данные трансформаторов и данные измерительных приборов.

2. Собрать схему по рис. 3.1; после проверки ее преподавателем произвести фазировку трансформаторов и включить трансформаторы на параллельную работу.

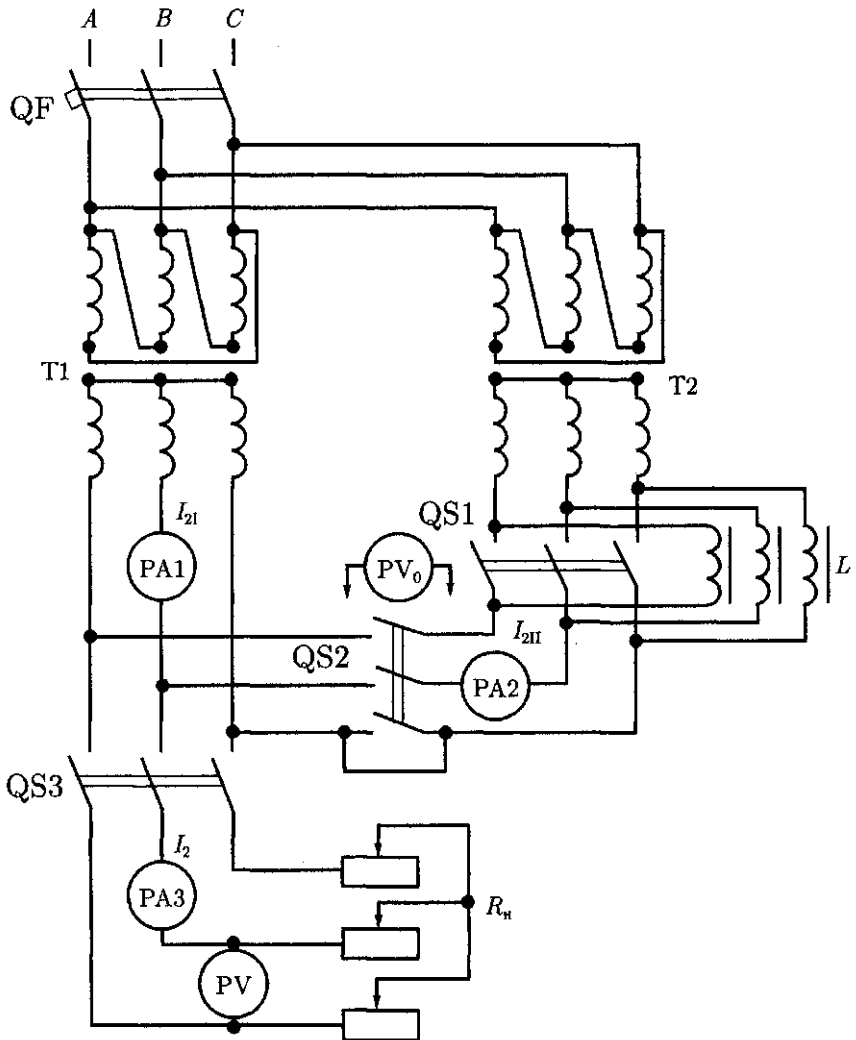


Рис. 3.1. Схема включения трехфазных трансформаторов на параллельную работу

3. Снять данные и построить внешние характеристики трансформаторов:  $U_2 = f(I_{2I})$ ;  $U_2 = f(I_{2II})$ ;  $U_2 = f(I_2)$  при одинаковых напряжениях короткого замыкания (рубильник QS2 замкнут).

4. Изменить напряжение короткого замыкания трансформатора Т2 путем последовательного включения в его вторичную цепь трехфазного дросселя  $L$  (рубильник QS2 разомкнут) и повторить опыт по п. 3.

5. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал [5]: назначение параллельной работы трансформаторов; условия и порядок включения трансформаторов на параллельную работу; распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицу для занесения результатов опытов и две координатные сетки для построения внешних характеристик.

### Порядок выполнения работы

**Проверка условий включения трансформаторов на параллельную работу.** Для лучшего использования мощности трансформаторов при их параллельной работе необходимо, чтобы нагрузка между ними распределялась пропорционально их номинальным мощностям. Поэтому включение трансформаторов на параллельную работу допускается лишь при соблюдении следующих условий:

1) трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации, т. е. при одинаковых первичных напряжениях вторичные напряжения трансформаторов должны быть равны;

2) трансформаторы должны принадлежать к одной группе соединения;

3) трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения короткого замыкания;

4) схема соединений при включении трансформаторов должна обеспечивать одинаковый порядок следования фаз как на стороне ВН, так и на стороне НН.

Помимо этого рекомендуется, чтобы отношение номинальных мощностей трансформаторов, включенных для параллельной работы, было не более чем 3 : 1.

Нарушение первого и второго условий вызывает появление больших уравнительных токов между обмотками трансформаторов, что ведет к их чрезмерному перегреву, т. е. делает их совместную работу невозможной. Что же касается третьего условия, то неравенство напряжений короткого замыкания трансформаторов более чем на 10 % от их среднего значения ведет к тому, что распределение на-

грузки между трансформаторами становится в значительной степени непропорциональным их номинальным мощностям.

Равенство коэффициентов трансформации и напряжений короткого замыкания обеспечивается подбором трансформаторов по их паспортным данным. Коэффициенты трансформации  $k_I$  и  $k_{II}$  не должны различаться более чем на  $\pm 0,5\%$  от их среднего значения:

$$\Delta k = [(k_I - k_{II})/k]100 \leq \pm 0,5\%, \quad (3.1)$$

где  $k = \sqrt{k_I k_{II}}$  — среднее геометрическое значение коэффициентов трансформации.

Напряжения короткого замыкания  $u_{кI}$  и  $u_{кII}$  не должны различаться более чем на  $\pm 10\%$  от их среднего значения:

$$\Delta u_k = [(u_{кI} - u_{кII})/u_k]100 \leq \pm 10\%, \quad (3.2)$$

где  $u_k = (u_{кI} + u_{кII})/2$  — среднее арифметическое значение напряжений короткого замыкания.

Прежде чем подключить трансформаторы на параллельную работу, т.е. включить рубильник QS2, при включенном автомате QF (рис. 3.1) необходимо провести *фазировку* трансформаторов, т.е. проверку соответствия фаз вторичных ЭДС трансформаторов T1 и T2. Для этого при включенном рубильнике QS1 соединяют проводом одну пару противоположащих клемм рубильника QS2 и вольтметром PV<sub>0</sub> («нулевой вольтметр») измеряют напряжение между двумя несоединенными парами противоположащих клемм рубильника QS2. Если вторичные напряжения трансформаторов равны, их группы соединения одинаковы и порядок следования фаз у них один и тот же, то показания вольтметра PV<sub>0</sub> равны нулю. В этом случае рубильник QS2 можно замкнуть, т.е. включить трансформаторы на параллельную работу. Если же вольтметр показывает некоторое напряжение, то необходимо выяснить, какое из условий параллельной работы нарушено (обычно это нарушение одинакового порядка следования фаз), устранить его и вновь провести фазировку трансформаторов.

**Снятие данных и построение внешних характеристик трансформаторов при равенстве напряжений короткого замыкания ( $u_{кI} = u_{кII}$ ).** После включения трансформаторов на параллельную работу (при включенном рубильнике QS1) подключают нагрузку R<sub>н</sub> (включают рубильник QS3). Нагрузку постепенно увеличивают, пока нагрузочный ток каждого трансформатора не достигнет значения  $I_{2II} = I_{2ном}$ . При этом приблизительно через одинаковые интервалы тока нагрузки снимают показания приборов и заносят их в табл. 3.1.

Следует снять не менее пяти замеров и одно из них должно соответствовать номинальной нагрузке трансформаторов.

По полученным данным строят внешние характеристики (см. п. 3 программы работы) на общей координатной сетке.

Таблица 3.1

Параметр	$u_{к1} = u_{кII}$				$u_{к1} < u_{кII}$			
$I_{2I}$ , А								
$I_{2II}$ , А								
$I_2$ , А								
$U_2$ , В								

**Снятие данных и построение внешних характеристик трансформаторов при неравенстве напряжений короткого замыкания ( $u_{к1} \neq u_{кII}$ ).** После включения трансформаторов на параллельную работу следует разомкнуть рубильник QS1, шунтирующий трехфазный дроссель  $L$ . При этом последовательно к вторичным обмоткам трансформатора Т2 оказывается подключенным дроссель, что приводит к увеличению напряжения короткого замыкания  $u_{кII}$  этого трансформатора. В результате нарушается равенство напряжений короткого замыкания параллельно работающих трансформаторов. Затем нагружают трансформаторы (закрывают рубильник QS3) и увеличивают нагрузку до тех пор, пока ток нагрузки более нагружаемого трансформатора не достигнет значения  $I_2 = 1,2I_{2ном}$ . Приблизительно через одинаковые интервалы тока нагрузки этого трансформатора снимают не менее пяти показаний приборов и заносят их в табл. 3.1. При этом одно из показаний должно соответствовать номинальному значению тока нагрузки наиболее нагружаемого трансформатора. По полученным данным строят внешние характеристики трансформаторов (см. п. 4 программы работы).

### Анализ результатов лабораторной работы

При анализе результатов лабораторной работы основное внимание уделяют вопросу распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами. Сравнивая данные табл. 3.1 при  $u_{к1} = u_{кII}$  и  $u_{к1} < u_{кII}$ , а также внешние характеристики трансформаторов для этих случаев параллельной работы, следует сделать вывод о влиянии неравенства напряжений короткого замыкания на распределение нагрузки между трансформаторами. Известно, что длительная перегрузка трансформаторов недопустима. Поэтому по результатам лабораторной работы необходимо определить, насколько один из трансформаторов окажется недогруженным при номинальной нагрузке другого трансформатора (при неравенстве напряжений короткого замыкания).

Если менее нагружаемым является трансформатор Т2, то при номинальной нагрузке трансформатора Т1 его недогрузка (%)

$$\Delta I_{II} = [(I_{2IIном} - I_{2II}) / I_{2IIном}] 100, \quad (3.3)$$

где  $I_{2\Pi\text{ном}}$  — номинальный ток нагрузки Т2, А;  $I_{2\Pi}$  — ток нагрузки Т2 при номинальной нагрузке Т1, А.

### **Контрольные вопросы**

1. С какой целью применяют параллельную работу трансформаторов?
2. Каковы условия включения трансформаторов на параллельную работу?
3. Почему не допускается включение на параллельную работу трансформаторов с разными группами соединения даже при одинаковых вторичных напряжениях?
4. Каковы допуски на различие коэффициентов трансформации и напряжений короткого замыкания для трансформаторов, включаемых на параллельную работу?
5. Что такое фазировка трансформаторов, для чего и как она выполняется?
6. От чего зависит распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4**

### **Исследование однофазного автотрансформатора**

**Цель работы.** Экспериментально подтвердить особые свойства автотрансформатора сравнением его параметров с параметрами трансформатора, полученными при исследовании совмещенной модели.

#### **Программа работы**

1. Ознакомиться с конструкцией совмещенной модели трансформатора и автотрансформатора, записать ее технические характеристики, а также данные измерительных приборов и регулятора напряжения.
2. Собрать схему понижающего трансформатора по рис. 4.1, а и после проверки ее преподавателем выполнить опыты холостого хода и номинальной нагрузки.
3. Собрать схему понижающего автотрансформатора по рис. 4.1, б и после проверки ее преподавателем выполнить опыты холостого хода и номинальной нагрузки.
4. Собрать схему повышающего автотрансформатора по рис. 4.1, в и после проверки ее преподавателем выполнить опыты холостого хода и номинальной нагрузки.
5. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

#### **Подготовка к работе**

1. Повторить теоретический материал [5]: автотрансформаторы, их устройство, особенности рабочего процесса, достоинства и недо-

статки по сравнению с обычными двухобмоточными трансформаторами; области применения автотрансформаторов.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицу для занесения результатов опытов.

**Конструкция совмещенной модели трансформатора и автотрансформатора.** Совмещенная модель трансформатора и автотрансформатора представляет собой однофазный трехобмоточный

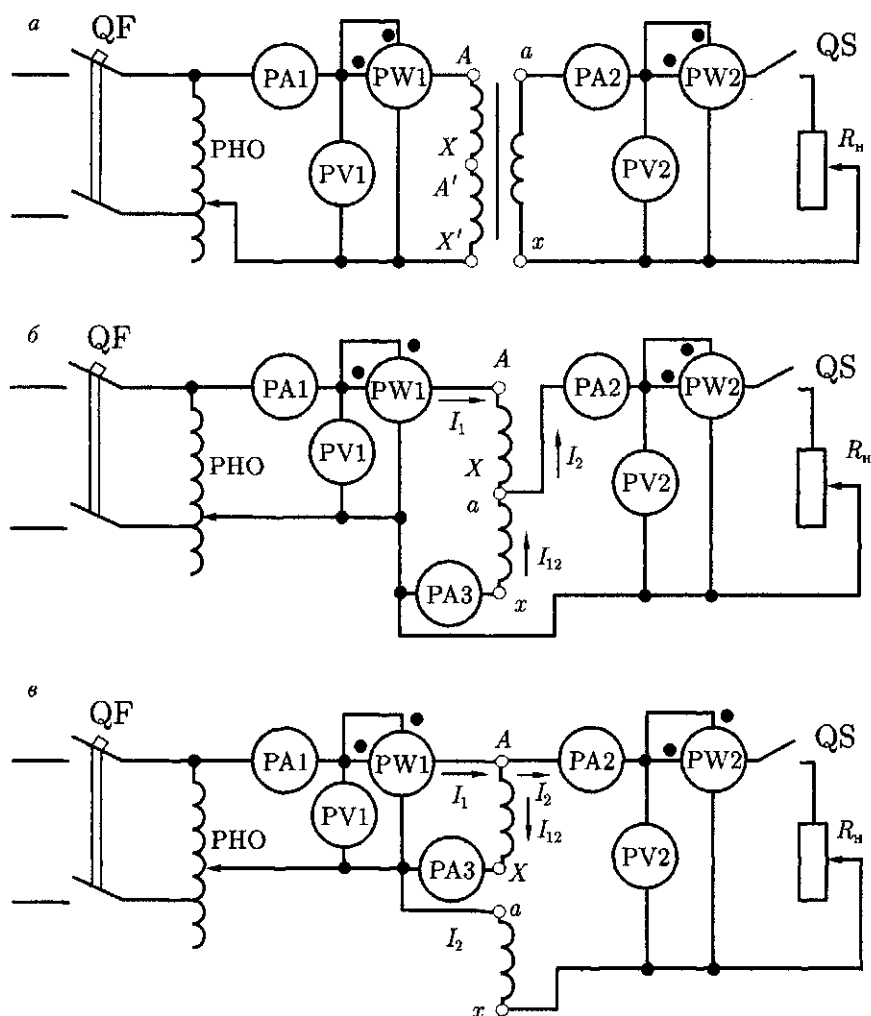


Рис. 4.1. Схемы соединений при исследованиях:

*a* — понижающего трансформатора; *б* — понижающего автотрансформатора; *в* — повышающего автотрансформатора



трансформатор, состоящий из магнитопровода (стержневого или броневое) и трех одинаковых электрически не связанных между собой обмоток. Различные комбинации соединения этих обмоток дают возможность исследовать все предлагаемые в данной работе варианты (рис. 4.1). Опытное исследование всех этих вариантов на одной модели позволяет сравнить результаты экспериментов и дать объективную оценку свойствам трансформатора и автотрансформатора (повышающего и понижающего). Обычно мощность исследуемой совмещенной модели невелика (300–500 В · А) и поэтому проста в изготовлении. Небольшая мощность модели способствует упрощению электрических схем исследования (включение ваттметров без трансформаторов тока и напряжения).

Задавшись размерами магнитопровода, определим число витков одной обмотки совмещенной модели:

$$w = 0,95 U / (4,44 f B_c S_c k_c), \quad (4.1)$$

где  $U$  — напряжение на выводах обмотки, В;  $f$  — частота тока, Гц;  $B_c$  — магнитная индукция в стержне магнитопровода, Тл;  $S_c$  — площадь поперечного сечения стержня, м<sup>2</sup>;  $k_c$  — коэффициент заполнения магнитопровода сталью (при толщине листов 0,35 мм  $k_c = 0,90$ ).

В стержне магнитопровода броневое типа из тонколистовой горячекатаной электротехнической стали марок 1211 или 1511 при частоте тока  $f = 50$  Гц магнитная индукция  $B_c = 1,20 - 1,35$  Тл, а в магнитопроводе из холоднокатаной стали марок 3411, 3412 или 3413 индукция  $B_c = 1,50 - 1,65$  Тл.

■ **Пример.** Определить число витков и диаметр обмоточного провода обмотки совмещенной модели «трансформатор — автотрансформатор» при следующих данных: напряжение  $U = 110$  В, допустимое значение тока  $I_{\text{дон}} = 2,5$  А, частота тока  $f = 50$  Гц.

**Решение.** Выбираем магнитопровод броневое типа Ш40 × 80 из стандартных Ш-образных пластин (рис. 4.2). Площадь поперечного сечения стержня

$$S_c = 40 \cdot 80 \cdot 10^{-6} = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Число витков в обмотке (4.1)

$$w = 0,95 \cdot 110 / (4,44 \cdot 50 \times \\ \times 1,25 \cdot 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,90) = \\ = 130 \text{ витков.}$$

По допустимому значению плотности тока  $j = 2,0$  А/мм<sup>2</sup> расчетное сечение провода  $q' =$

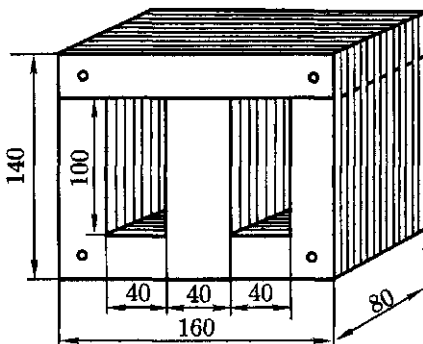


Рис. 4.2. Магнитопровод совмещенной модели «трансформатор — автотрансформатор»

$= 2,5/2,0 = 1,25 \text{ мм}^2$ , ближайшее стандартное сечение провода  $q = 1,33 \text{ мм}^2$ . Тогда принимаем диаметр обмоточного провода марки ПЭТВ  $d = 1,30 \text{ мм}$  и диаметр с учетом толщины изоляции  $d_{из} = 1,41 \text{ мм}$ . Все три обмотки располагаем на каркасе из картона толщиной  $1 \text{ мм}$ . При рядовой укладке витков число витков в одном слое

$$w_{сл} = (100 - 2 \cdot 1) / d_{из} = 98 / 1,41 = 70 \text{ витков,}$$

число слоев в обмотке  $n_{сл} = w / w_{сл} = 130 / 70 \approx 2$  слоя, общее число слоев в трех обмотках  $n_{сл} = 2 \cdot 3 = 6$  слоев.

Межслоевую изоляцию выполняем из лакоткани ЛХ в два слоя толщиной  $0,5 \text{ мм}$ , во всех обмотках общая толщина межслоевой изоляции  $0,5 \cdot 6 = 3,0 \text{ мм}$ . Тогда расчетная высота окна намотки  $H_p = 1 + 3,0 + 1,41 \cdot 6 = 13 \text{ мм}$ , что меньше фактической высоты окна намотки  $H = 40 \text{ мм}$  (рис. 4.2).

### Порядок выполнения работы

**Исследование понижающего трансформатора.** После сборки схемы по рис. 4.1, а и проверки ее преподавателем провести опыт холостого хода трансформатора. Для этого при разомкнутом ключе QS включить автомат QF и регулятором РНО установить номинальное первичное напряжение. Снять показания приборов и занести их в табл. 4.1.

Затем провести опыт номинальной нагрузки трансформатора. Для этого замкнуть ключ QS, включить автомат QF и при номинальном первичном напряжении нагрузочным реостатом  $R_n$  установить номинальный ток нагрузки во вторичной обмотке трансформатора  $I_{2ном}$ . При этом снять показания приборов и занести их в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Режим работы совмещенной модели	Измерения									Вычисления				
	$U_1, \text{В}$	$U_{2Ф}, \text{В}$	$I_0, \text{А}$	$P_0, \text{Вт}$	$I_1, \text{А}$	$P_1, \text{Вт}$	$I_{2ном}, \text{А}$	$U_2, \text{В}$	$P_2, \text{Вт}$	$I_{2Ф}, \text{А}$	$\Delta U_{ном}, \%$	$\Sigma P, \text{Вт}$	$P_{2Ф}, \text{Вт}$	$\eta, \%$
Трансформатор понижающий														
Автотрансформатор понижающий														
Автотрансформатор повышающий														

**Исследование понижающего автотрансформатора.** Понижающий автотрансформатор по схеме, показанной на рис. 4.1, б, имеет такой же коэффициент трансформации, что и понижающий трансформатор (см. рис. 4.1, а). После сборки схемы понижающего автотрансформатора и проверки ее преподавателем провести опыт холостого хода (при разомкнутом ключе QS) и опыт номинальной нагрузки (при замкнутом ключе QS). Порядок проведения опытов такой же, как и для понижающего трансформатора.

**Исследование повышающего автотрансформатора.** Собрав схему по рис. 4.1, в, после проверки ее преподавателем проводят сначала опыт холостого хода, а затем опыт номинальной нагрузки, где за номинальный ток нагрузки  $I_{ном}$  принимают такое его значение, при котором ток в первичной обмотке равен допустимому значению  $I_{доп}$ . После заполнения табл. 4.1 результатами измерений выполняют расчеты:

номинальное изменение вторичного напряжения при нагрузке (%)

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} 100; \quad (4.2)$$

сумма потерь в трансформаторе (Вт)

$$\Sigma P = P_1 - P_2; \quad (4.3)$$

электрические потери (Вт)

$$P_3 = \Sigma P - P_0; \quad (4.4)$$

КПД (%)

$$\eta = (P_2/P_1)100. \quad (4.5)$$

### Анализ результатов лабораторной работы

При анализе результатов лабораторной работы сравнивают параметры совмещенной модели в различных ее режимах. При этом дают объяснение различию одного и того же параметра при работе модели в различных режимах. Рассмотрим сравнение некоторых параметров.

1. Номинальное изменение напряжения при нагрузке  $\Delta U_{ном}$  автотрансформатора меньше, чем у трансформатора. Это объясняется тем, что падение напряжения во вторичной цепи автотрансформатора меньше, чем у трансформатора, так как в автотрансформаторе оно вызывается током

$$I_{12} = I_2 - I_1,$$

а в трансформаторе — током  $I_2$  (сопоставьте значения этих токов по результатам измерений).

2. Сравнивая электрические потери на нагрев обмоток  $P_3$ , следует иметь в виду, что эти потери в автотрансформаторе меньше, чем

у трансформатора, так как у автотрансформатора всего лишь одна обмотка, да к тому же на общем участке ее витков, принадлежащих первичной и вторичной цепям, ток меньше вторичного тока трансформатора. Этим же, в частности, объясняется и более высокий КПД автотрансформаторов.

3. Ток холостого хода повышающего автотрансформатора несколько больше, чем у понижающего. Объясняется это тем, что в понижающем автотрансформаторе первичная МДС создается двумя последовательно соединенными обмотками, а в повышающем — лишь одной.

### **Контрольные вопросы**

- 58401
1. В чем состоит конструктивное различие между трансформатором и автотрансформатором?
  2. Объясните принцип передачи мощности из первичной цепи во вторичную у трансформатора и автотрансформатора.
  3. Каковы достоинства автотрансформатора перед трансформатором?
  4. При каких значениях коэффициента трансформации применение автотрансформатора наиболее выгодно?
  5. Каковы недостатки автотрансформатора, ограничивающие его применение?
  6. Почему токи холостого хода у понижающего и повышающего автотрансформаторов неодинаковы?

## **Глава 2**

### **АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ**

#### **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5**

#### **Исследование трехфазного асинхронного двигателя методом непосредственной нагрузки**

**Цель работы.** Изучить конструкцию трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, усвоить приемы опытной проверки обозначений выводов обмотки статора и экспериментального исследования асинхронного двигателя методом непосредственной нагрузки.

#### **Программа работы**

1. Ознакомиться с конструкцией двигателя и устройством для его нагрузки; записать паспортные данные двигателя и данные измерительных приборов и регулировочных устройств.

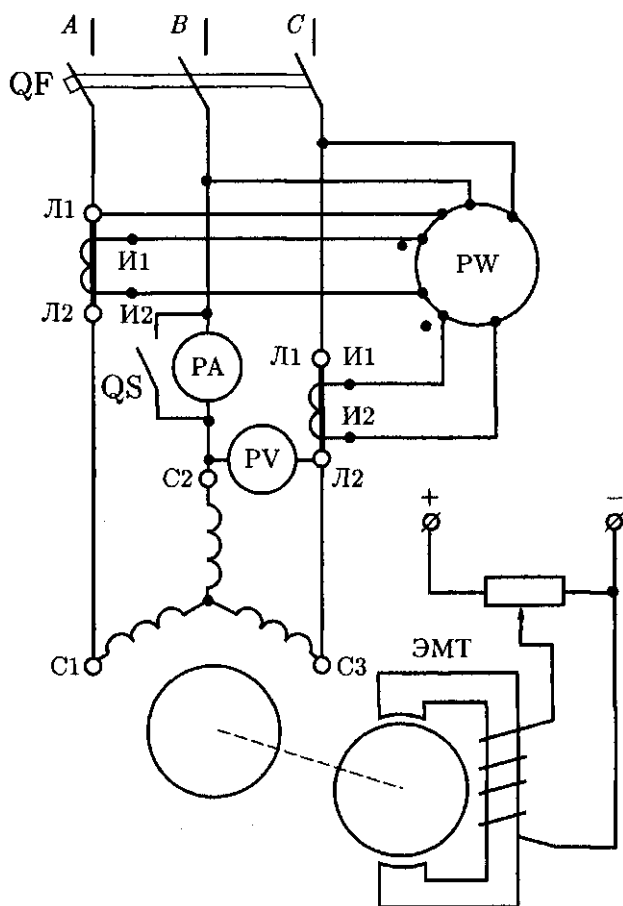


Рис. 5.1. Схема включения трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

2. Экспериментально проверить обозначение выводов обмотки статора.
3. Собрать схему по рис. 5.1 и после проверки ее преподавателем произвести пробный пуск и реверсирование двигателя.
4. Снять данные и построить рабочие характеристики двигателя.
5. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал [5]: принцип действия и устройство трехфазного асинхронного двигателя; понятие о скольжении; электромагнитный момент асинхронного двигателя; зави-

симось момента от скольжения; перегрузочная способность асинхронного двигателя; рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицу для занесения результатов опыта и координатную сетку для построения рабочих характеристик.

### Порядок выполнения работы

**Проверка выводов обмотки статора.** Для правильного соединения обмотки статора в «звезду» или «треугольник» необходимо точно знать маркировку выводов обмотки статора. Это делают следующим образом. Сначала определяют выводы каждой фазной обмотки статора с помощью «сигнальной» лампы, включенной, как это показано на рис. 5.2, *а*. Прикоснувшись концом одного из проводов этой лампы какого-либо вывода обмотки статора, концом другого провода, подключенного к сети, касаются поочередно других выводов обмотки. При прикосновении к одному из выводов лампа загорается. Это свидетельствует о том, что пара выводов, которых касаются в данный момент концы проводов, принадлежит одной фазной обмотке. Эту пару выводов отмечают и переходят к отысканию выводов второй, а потом и третьей фазных обмоток.

Затем определяют начала и концы каждой фазной обмотки. Для этого, обозначив произвольно начала и концы всех трехфазных обмоток, соединяют последовательно какие-либо две из них (например, фазные обмотки *A* и *B*), как это показано на схеме рис. 5.2, *б*, и подключают их к источнику переменного тока. Последовательно в цепь включают резистор  $r$  такого сопротивления, чтобы ток в цепи этих обмоток не превысил номинального значения. К оставшейся третьей фазной обмотке подключают вольтметр (можно восполь-

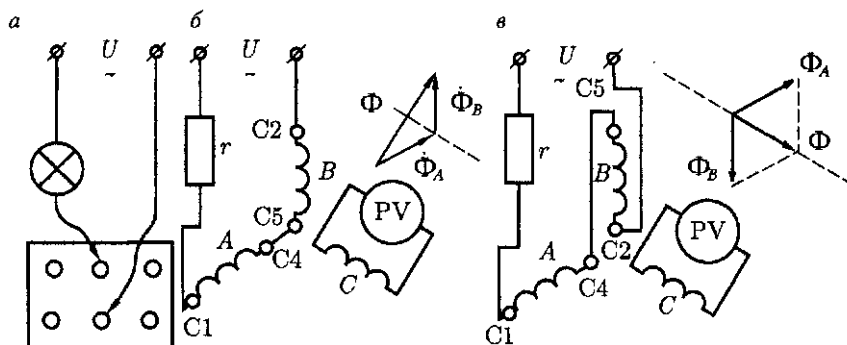


Рис. 5.2. Схемы для определения и маркировки выводов фазных обмоток статора

зоваться «сигнальной» лампой). Если предварительная маркировка выводов обмоток  $A$  и  $B$  была *правильной*, то вольтметр, подключенный к выводам фазы  $C$ , не покажет напряжения (лампа не загорится). Объясняется это тем, что ось результирующего потока фазных обмоток  $A$  и  $B$   $\Phi = \Phi_A + \Phi_B$  направлена под углом  $90^\circ$  к оси фазной обмотки  $C$  и поэтому не наводит в ней ЭДС.

Если же предварительная маркировка выводов одной из обмоток, например обмотки  $B$ , оказалась *неправильной* и схема имела вид, представленный на рис. 5.2, *в*, то ось результирующего потока обмоток  $A$  и  $B$  совпадает с осью фазной обмотки  $C$  и наводит в этой обмотке некоторую ЭДС, при этом вольтметр на выводах обмотки  $C$  покажет напряжение (лампа загорится).

**Схема включения и пробный пуск двигателя.** Схема включения двигателя (см. рис. 5.1) содержит двухэлементный ваттметр  $PW$ , предназначенный для измерения активной мощности, потребляемой двигателем из сети. Токовые катушки этого ваттметра включены в сеть через измерительные трансформаторы тока.

После проверки схемы преподавателем осуществляют пробный пуск двигателя включением автомата  $QF$ . Предварительно следует замкнуть ключ  $QS$ , шунтирующий амперметр  $PA$  с целью предохранения его от чрезмерно большого пускового тока двигателя. Затем двигатель отключают от сети и меняют местами любую пару проводов, соединяющих обмотку статора с сетью. В этом случае вращающееся поле статора при включении обмотки статора в сеть будет вращаться в направлении, противоположном тому, какое было до переключения проводов. Другими словами, произойдет *реверсирование* двигателя, т.е. его ротор будет вращаться в другую сторону.

**Снятие данных и построение рабочих характеристик.** Посредством автомата  $QF$  (при замкнутом ключе  $QS$ ) включают двигатель в сеть (см. рис. 5.1). Затем размыкают ключ  $QS$  с помощью электромагнитного тормоза (ЭМТ) либо другого нагрузочного устройства создают на валу двигателя нагрузочный момент  $M_2$  и увеличивают его до тех пор, пока ток в цепи статора не достигнет значения  $I_1 = 1,2I_{1ном}$ . При этом через приблизительно одинаковые интервалы тока  $I_1$  снимают показания приборов и заносят их в табл. 5.1. Первый отсчет по приборам делают в режиме холостого хода ( $M_2 = 0$ ). Необходимо снять не менее пяти показаний, одно из них должно соответствовать номинальному режиму ( $I_1 = I_{1ном}$ ). Затем выполняют расчеты:

подводимая к двигателю мощность (Вт)

$$P_1 = P'_1 k_T C_W; \quad (5.1)$$

где  $k_T$  — коэффициент трансформации трансформатора тока;  $C_W$  — цена деления ваттметра, Вт/дел.;

Таблица 5.1

Номер измерения	Измерения					Вычисления				
	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$P_1$ , дел.	$n_2$ , об/мин	$M_2$ , Н·м	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$\eta$ , %	$\cos \varphi_1$	$s$

полезная мощность двигателя — мощность на валу (Вт)

$$P_2 = 0,105M_2n_2, \quad (5.2)$$

где  $n_2$  — частота вращения ротора, об/мин;  $M_2$  — нагрузочный момент, Н·м; если  $M_2$  измерен в устаревших единицах кгс·м, то

$$P_2 = 0,105 \cdot 9,81M_2n_2; \quad (5.3)$$

КПД двигателя

$$\eta = (P_2/P_1)100; \quad (5.4)$$

коэффициент мощности

$$\cos \varphi_1 = P_1/(\sqrt{3}U_1I_1); \quad (5.5)$$

скольжение

$$s = (n_1 - n_2)/n_1. \quad (5.6)$$

По данным табл. 5.1 строят рабочие характеристики двигателя (на одной координатной сетке):  $I_1$ ;  $n_2$ ;  $M_2$ ;  $\eta$  и  $\cos \varphi_1 = f(P_2)$ , примерный вид которых показан на рис. 5.3.

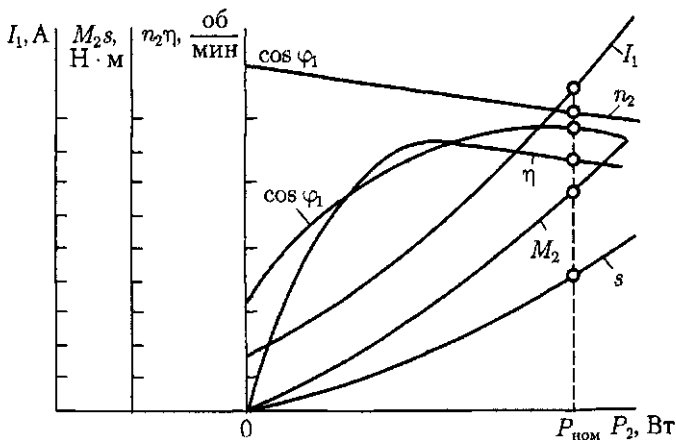


Рис. 5.3. Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя



## Анализ результатов лабораторной работы

При анализе результатов лабораторной работы в первую очередь следует сделать заключение о соответствии данных номинального режима исследуемого двигателя, полученных экспериментально, его паспортным данным. Затем, анализируя рабочие характеристики, нужно объяснить вид полученных графиков. Например, график тока  $I_1 = f(P_2)$  не выходит из начала координат, так как в режиме холостого хода двигатель потребляет из сети ток холостого хода  $I_{10}$ , обусловленный потерями холостого хода.

Характеристика частоты вращения  $n_2 = f(P_2)$  имеет падающий вид, т.е. с ростом нагрузки частота вращения ротора уменьшается. При этом чем больше активное сопротивление обмотки ротора  $r_2'$ , тем больше наклон этой характеристики к оси абсцисс, так как увеличение этого сопротивления вызывает возрастание электрических потерь в цепи ротора, а следовательно, и скольжения, значение которого пропорционально электрическим потерям в роторе.

Небольшое значение коэффициента мощности в зоне малых нагрузок двигателя объясняется тем, что в режиме холостого хода и при небольшой нагрузке двигателя ток статора меньше номинального и в значительной части является намагничивающим током, имеющим фазовый сдвиг относительно напряжения сети, близкий к  $90^\circ$ . Значительная величина намагничивающего тока в асинхронных двигателях обусловлена наличием воздушного зазора между статором и ротором. С повышением нагрузки двигателя ток  $I_1$ , потребляемый двигателем из сети, увеличивается в основном за счет активной составляющей, что и способствует росту коэффициента мощности.

### Контрольные вопросы

1. На чем основан принцип действия асинхронного двигателя?
2. Объясните устройство трехфазного асинхронного двигателя.
3. Что такое скольжение и каким оно обычно бывает у асинхронных двигателей общего назначения?
4. С какой целью у асинхронного двигателя обычно делают шесть выводов обмотки статора?
5. Как определить начало и конец фазной обмотки статора?
6. Что такое реверсирование и как его осуществить в трехфазном асинхронном двигателе?
7. В чем сущность метода непосредственной нагрузки при исследовании асинхронного двигателя?
8. Какие характеристики асинхронного двигателя называют рабочими?
9. Почему относительное значение тока холостого хода у асинхронного двигателя больше, чем у трансформатора такой же мощности?
10. Как изменится вращающий момент асинхронного двигателя, если напряжение на его выводах обмотки статора уменьшить в  $\sqrt{3}$  раз?
11. Что такое перегрузочная способность асинхронного двигателя и какова ее зависимость от напряжения питания двигателя?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

### Исследование трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором методом холостого хода и короткого замыкания

**Цель работы.** Изучение конструкции трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором и приобретение практических навыков в сборке схем соединения двигателя, его пуске с применением пускового реостата и проведении опытов холостого хода и короткого замыкания. Подтверждение теоретических сведений о круговой диаграмме асинхронного двигателя путем ее построения и использования этой диаграммы для расчета рабочих характеристик двигателя.

#### Программа работы

1. Ознакомиться с конструкцией трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором; записать его паспортные данные, а также данные измерительных приборов и регулирующих устройств.
2. Собрать схему по рис. 6.1 и после проверки ее преподавателем произвести пробный пуск двигателя.
3. Выполнить опыт холостого хода.
4. Выполнить опыт короткого замыкания.
5. Построить упрощенную круговую диаграмму двигателя.
6. Рассчитать и построить рабочие характеристики, используя упрощенную круговую диаграмму двигателя.
7. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

#### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал [5]: устройство трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором; обоснование круговой диаграммы асинхронного двигателя; упрощенная круговая диаграмма и ее построение по данным опытов холостого хода и короткого замыкания; расчет рабочих характеристик двигателя по круговой диаграмме.
2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов, полученных при проведении опытов холостого хода и короткого замыкания и для построения рабочих характеристик, а также два листа миллиметровой бумаги форматом не менее А4 для построения круговой диаграммы и ее рабочего участка.

#### Порядок выполнения работы

**Схема включения и пробный пуск двигателя.** В схеме соединений (см. рис. 6.1) для измерения активной мощности, потребляе-



чтобы измерять фазные значения тока и напряжения в обмотке статора. При соединении обмотки статора в «треугольник» эти приборы следует включить, как это показано на рис. 6.1, б.

После проверки схемы преподавателем выполняют пробный пуск двигателя:

а) включают автомат QF1 и устанавливают на выходе РНТ номинальное напряжение (вольтметр PV1);

б) ставят рукоятку пускового реостата ПР в положение «Пуск»;

в) замыкают ключ QS и включают автомат QF2, подав напряжение на обмотку статора;

г) медленно переводят рукоятку ПР из положения «Пуск» в положение «Работа» и размыкают ключ QS.

Для остановки двигателя необходимо отключить автомат QF2, поставить рукоятку ПР в положение «Пуск» и замкнуть ключ QS, подготовив двигатель для следующего пуска.

**Опыт холостого хода.** Установив с помощью РНТ номинальное напряжение и осуществив пуск двигателя, снимают показания приборов и заносят их в табл. 6.1. При этом двигатель должен работать без нагрузки на валу. Затем выполняют расчеты:

мощность, потребляемая двигателем в режиме холостого хода (Вт),

$$P_{10} = P'_{10} k_T C_W, \quad (6.1)$$

где  $k_T$  — коэффициент трансформации трансформатора тока;  $C_W$  — цена деления ваттметра, Вт/дел;

коэффициент мощности двигателя в режиме холостого хода

$$\cos \varphi_0 = P_{10} / (3 U_1 I_{10}); \quad (6.2)$$

угол сдвига фаз между током  $I_1$  и напряжением  $U_1$  (град)

$$\varphi_0 = \arccos \cos \varphi_0. \quad (6.3)$$

Результаты вычислений заносят в табл. 6.1.

**Опыт короткого замыкания.** Схема соединений остается прежней (см. рис. 6.1). Закрепив вал двигателя так, чтобы исключить его вращение при включении, и поставив рукоятку РНТ в положение минимального напряжения, включают двигатель замыканием

Таблица 6.1

Опыт холостого хода						Опыт короткого замыкания								
Измерения			Вычисления			Измерения			Вычисления					
$U_1$ , В	$I_{10}$ , А	$P'_{10}$ , дел	$P_{10}$ , Вт	$\cos \varphi_0$	$\varphi_0$ , град	$U_k$ , В	$I_{1k}$ , А	$P'_{1k}$ , дел	$P_{1k}$ , Вт	$\cos \varphi_k$	$z_k$ , Ом	$x_k$ , Ом	$r_k$ , Ом	$r'_2$ , Ом

автомата QF2. Затем медленно перемещают рукоятку РНТ в сторону повышения напряжения, пока оно не достигнет значения  $U_k$  (по показанию вольтметра V2, при котором фазный ток короткого замыкания в обмотке статора равен номинальному значению (фазного) тока  $I_{1ном}$ . При этом снимают показания приборов и заносят их в табл. 6.1. Затем отключают двигатель и выполняют расчеты:

мощность короткого замыкания (Вт)

$$P_{1к} = P'_{1к} k_T C_W; \quad (6.4)$$

коэффициент мощности двигателя в режиме короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = P_{1к} / (3 U_k I_{1ном}); \quad (6.5)$$

полное сопротивление двигателя в режиме короткого замыкания (Ом)

$$z_k = U_k / I_{1ном}; \quad (6.6)$$

активное и индуктивное сопротивления в режиме короткого замыкания (Ом)

$$r_{к20} = z_k \cos \varphi_k; \quad (6.7)$$

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_{к20}^2}; \quad (6.8)$$

сопротивления обмоток, приведенные к рабочей температуре (Ом); активное сопротивление двигателя в режиме короткого замыкания

$$r_k = r_{к20} [1 + \alpha (\theta_{раб} - 20^\circ)]; \quad (6.9)$$

активное сопротивление обмотки ротора

$$r'_2 = r_k - r_1. \quad (6.10)$$

Здесь  $\alpha = 0,004$  — температурный коэффициент сопротивления для меди и алюминия;  $\theta_{раб}$  — рабочая температура обмоток двигателя (указана в паспортных данных двигателя), °С;  $r_1$  — активное сопротивление фазной обмотки статора при рабочей температуре (указана в паспортных данных двигателя), Ом.

Результаты вычислений заносят в табл. 6.1.

**Построение упрощенной круговой диаграммы.** На листе миллиметровой бумаги размером не менее  $210 \times 300$  мм проводят оси координат (рис. 6.2). Затем, выбрав масштаб тока  $m_i$  (А/мм), строят вектор тока холостого хода  $\dot{I}_{10}$  под углом  $\varphi_0$  к оси ординат. При этом длина вектора тока  $\dot{I}_{10}$  (мм)

$$\overline{OH} = \dot{I}_{10} / m_i. \quad (6.11)$$

Из точки  $H$ , называемой точкой холостого хода, проводят прямую, параллельную оси абсцисс, на которой откладывают отрезок  $\overline{HC}$ , равный диаметру окружности токов (мм):

$$D_i = (U_{1ном} / x_k) / m_i. \quad (6.12)$$

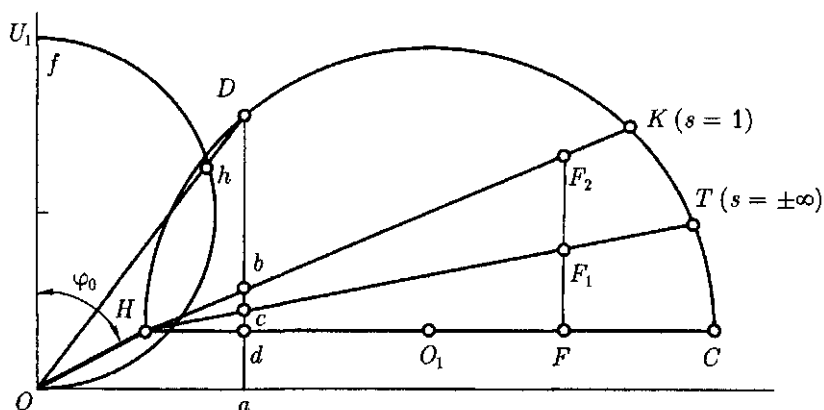


Рис. 6.2. Упрощенная круговая диаграмма трехфазного асинхронного двигателя

При выборе масштаба токов  $m_i$  следует стремиться к тому, чтобы диаметр  $D_i$  был не менее 200 мм.

Разделив отрезок  $\overline{HC}$  на две равные части, получают точку  $O_1$ , являющуюся центром окружности токов. Из этой точки радиусом  $0,5D_i$  проводят полуокружность. В средней части отрезка  $O_1C$  из точки  $F$  восстанавливают перпендикуляр, на котором отмечают отрезки (мм),

$$\overline{FF_1} = r_1 \overline{HF} / x_k; \quad \overline{FF_2} = r_k \overline{HF} / x_k. \quad (6.13)$$

Из точки  $H$  проводят прямые через точки  $F_1$  и  $F_2$  до пересечения с окружностью токов в точках  $T$  и  $K$ .

Точка  $T$  соответствует скольжению  $s = \pm\infty$ , а прямая  $\overline{HT}$  является линией электромагнитной мощности и момента. Точка  $K$ , называемая *точкой короткого замыкания*, соответствует скольжению  $s = 1$ , а прямая  $\overline{HK}$  является линией полезной мощности.

На оси ординат, как на диаметре, строят полуокружность диаметром  $Of = 100$  мм для определения коэффициента мощности двигателя.

**Построение рабочих характеристик двигателя по упрощенной круговой диаграмме.** Определив длину вектора тока  $\dot{I}_1 = 1,2 \dot{I}_{1\text{ном}}$ , отложив его в виде отрезка  $\overline{OD} = 1,2 \dot{I}_{1\text{ном}} / m_i$  и опустив из точки  $D$  перпендикуляр на ось абсцисс в точку  $a$ , определяют *рабочий участок* круговой диаграммы, ограниченный осью ординат и отрезком  $\overline{Da}$ . Пользуясь принципом подобия, увеличивают эту часть диаграммы в три раза и строят ее отдельно (рис. 6.3). Дугу  $HD$  (участок окружности токов) проводят радиусом, равным  $3D_i/2$ , а участок дуги полуокружности  $Of$  выполняют радиусом 150 мм. Для построения линий полезной и электромагнитной мощности необходимо тщательно измерить отрезки  $ad$ ,  $dc$  и  $cb$  на круговой диаграмме (см. рис. 6.2) и при построении рабочего участка диаграммы увеличить их в три раза.

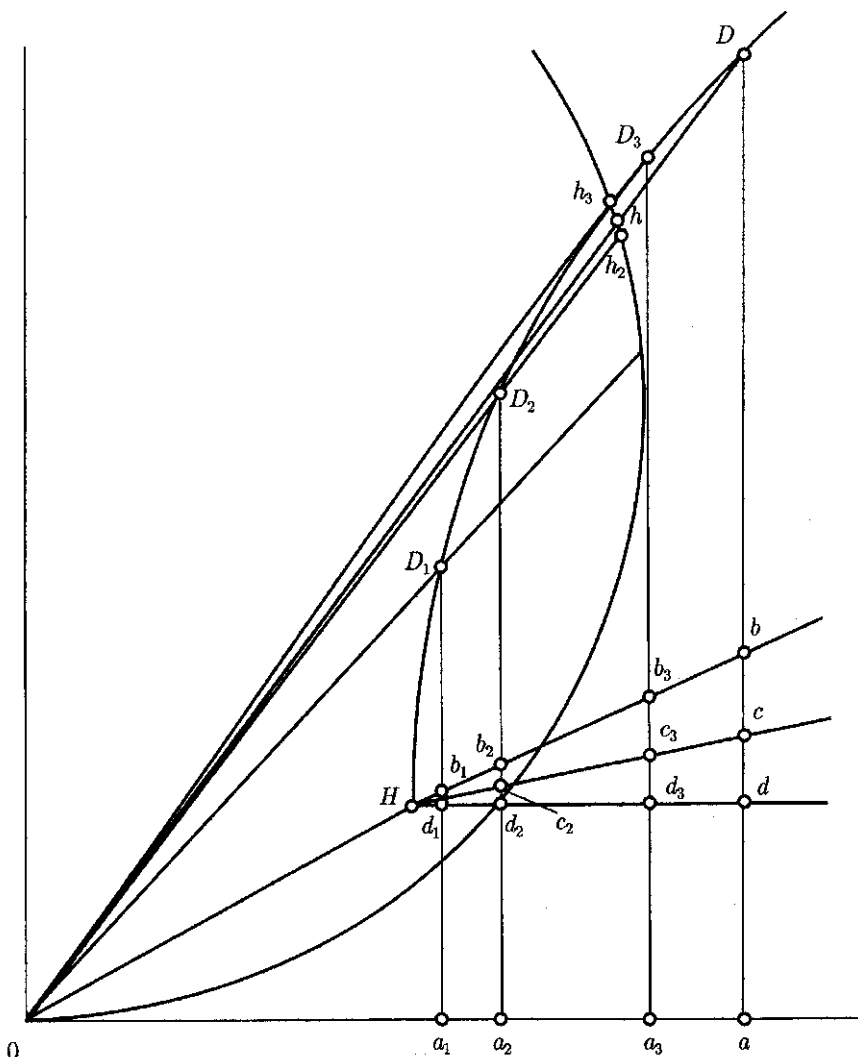


Рис. 6.3. Рабочий участок круговой диаграммы

При использовании рабочего участка диаграммы для определения параметров двигателя уменьшают масштаб тока  $m_i$  в три раза, т. е. принимают равным  $m_i = m_i/3$ . Затем вычисляют длину ряда отрезков, эквивалентных току статора при разных нагрузках двигателя:  $\overline{OD}_1 = 0,5I_{\text{ном}}/m'_i$ ;  $\overline{OD}_2 = 0,75I_{\text{ном}}/m'_i$ ;  $\overline{OD}_3 = I_{\text{ном}}/m'_i$ . Проведя эти отрезки из точки  $O$  до соприкосновения с дугой  $HD$ , получают точки  $D_1, D_2, D_3$ . Из этих точек опускают перпендикуляры на ось абсцисс в точки  $a_1, a_2, a_3$  и получают точки в местах пересечения

этих перпендикуляров с линиями полезной и электромагнитной мощности.

Измерив длину всех полученных отрезков, определяют параметры, необходимые для построения рабочих характеристик исследуемого двигателя\*:

подведенная мощность (Вт)

$$P'_1 = m'_p \overline{D_x a_x}, \quad (6.14)$$

где масштаб мощности (Вт/мм)

$$m'_p = 3 U'_{1\text{ном}} m'_i; \quad (6.15)$$

полезная мощность (Вт)

$$P_2 = m'_p \overline{D_x b_x}; \quad (6.16)$$

электромагнитная мощность (Вт)

$$P_{эм} = m'_p \overline{D_x c_x}; \quad (6.17)$$

электромагнитный момент (Н·м)

$$M = m'_m \overline{D_x c_x}, \quad (6.18)$$

где масштаб момента (Н·м/мм)

$$m'_m = 9,55 m'_p / n_1; \quad (6.19)$$

приведенный ток ротора (А)

$$I'_2 = m'_i \overline{HD_x}; \quad (6.20)$$

электрические потери в роторе (Вт)

$$P_{э2} = 3 I'^2_2 r'_2; \quad (6.21)$$

скольжение

$$s = P_{э2} / P_{эм}; \quad (6.22)$$

частота вращения ротора (об/мин)

$$n_2 = n_1 (1 - s), \quad (6.23)$$

где  $n_1$  — синхронная частота вращения, об/мин;

коэффициент мощности

$$\cos \varphi_1 = \overline{Oh_x} / 300; \quad (6.24)$$

КПД двигателя (%)

$$\eta = \left( 1 - \frac{\sum P}{P_1} \right) 100. \quad (6.25)$$

---

\* В приводимых выражениях индекс  $x$  принимают равным 1, 2 или 3, в зависимости от индекса в обозначении точки на окружности токов:  $D_1, D_2, D_3, x_1, x_2$  и т.д.



Таблица 6.2

$I_1, A$	$s$	$n_2, \text{об/мин}$	$P_1, \text{Вт}$	$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	$\cos \varphi_1$	$\eta, \%$	$P_2, \text{Вт}$
$I_{10} =$							
$0,5 I_{1\text{ном}} =$							
$0,75 I_{1\text{ном}} =$							
$I_{1\text{ном}} =$							
$1,2 I_{1\text{ном}} =$							

Сумма потерь (Вт)

$$\sum P = P_{\text{м1}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}} + P_{\text{доб}}. \quad (6.26)$$

Для большей точности сумму потерь  $\sum P$  определяют аналитически:

сумма магнитных и механических потерь (Вт)

$$(P_{\text{м1}} + P_{\text{мех}}) = P_{10} - 3I_{10}^2 r_{1,20}; \quad (6.27)$$

электрические потери в статоре (Вт)

$$P_{\text{э1}} = 3I_1^2 r_1; \quad (6.28)$$

электрические потери в роторе определены по (6.21);

добавочные потери (Вт)

$$P_{\text{доб}} = 5 \cdot 10^{-3} P_1, \quad (6.29)$$

где  $P_1$  определяют по (6.14).

Результаты вычислений заносят в табл. 6.2, а затем строят рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором.

### Анализ результатов лабораторной работы

При анализе результатов лабораторной работы сравнивают номинальные значения параметров, полученные из круговой диаграммы, с паспортными данными двигателя.

Затем сравнивают два метода экспериментального исследования асинхронных двигателей: метод непосредственной нагрузки (см. лабораторную работу № 5) и метод опытов холостого хода и короткого замыкания.

При сравнении необходимо учитывать следующие показатели: точность, экономичность, сложность лабораторного оборудования. В заключении указывают диапазоны мощностей асинхронных двигателей, для которых целесообразно применение того или иного метода исследования.

### **Контрольные вопросы**

1. В чем особенность устройства асинхронных двигателей с фазным ротором?
2. Каков порядок действий при пуске двигателей с фазным ротором?
3. Какова последовательность проведения опытов холостого хода и короткого замыкания?
4. Какие параметры двигателя, необходимые для построения упрощенной круговой диаграммы, определяют из опыта холостого хода, а какие из опыта короткого замыкания?
5. Объясните порядок построения упрощенной круговой диаграммы.
6. Чему равна полезная мощность асинхронного двигателя в режимах его работы, соответствующих точкам  $H$  и  $K$  на круговой диаграмме?
7. Как определить по круговой диаграмме активную и реактивную составляющие тока статора?
8. Что такое перегрузочная способность асинхронного двигателя и как ее определить по круговой диаграмме?
9. Как находят по круговой диаграмме параметры двигателя, необходимые для построения рабочих характеристик?

### **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7**

#### **Исследование способов пуска трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором**

**Цель работы.** Получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о пусковых свойствах трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, а также приобрести практические навыки в сборке схем и пуске этих двигателей.

#### **Программа работы**

1. Ознакомиться с конструкцией двигателя, реакторов и переключающих устройств; записать их паспортные данные, а также данные измерительных приборов.
2. Собрать схему по рис. 7.1 и после проверки ее преподавателем осуществить пуск двигателя прямым включением в сеть.
3. Используя схему рис. 7.1, произвести пуск двигателя с переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник».
4. Собрать схему по рис. 7.2 и после проверки ее преподавателем выполнить реакторный пуск двигателя.
5. Собрать схему по рис. 7.3 и после проверки ее преподавателем снять данные и построить график зависимости пускового момента двигателя от напряжения питания.
6. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

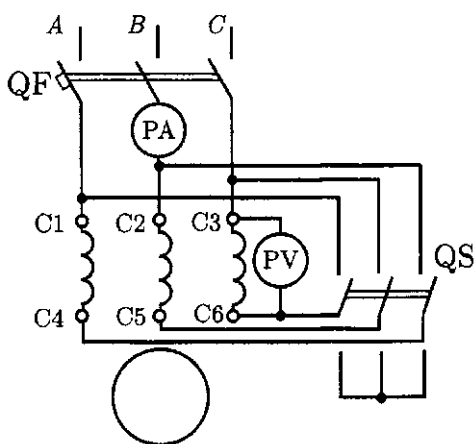


Рис. 7.1. Схема включения трехфазного асинхронного двигателя при пуске переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник»

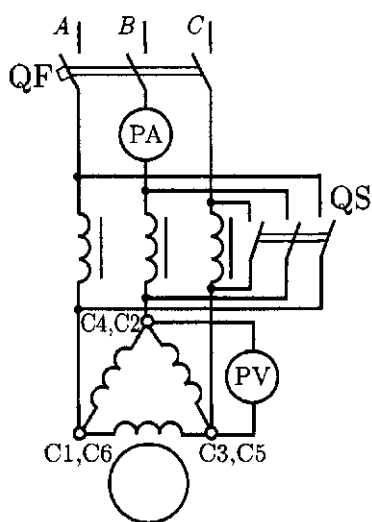


Рис. 7.2. Схема включения двигателя при реакторном пуске

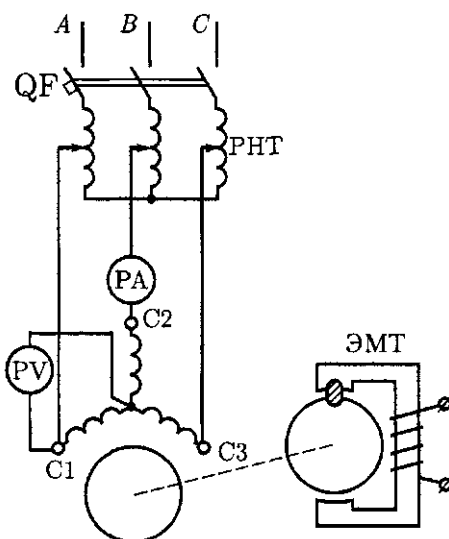


Рис. 7.3. Схема включения двигателя для определения зависимости пускового момента от напряжения

### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал [5]: пусковые свойства трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором; способы пуска при пониженном напряжении; влияние напряжения питания на значение пускового тока и пускового момента.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатную сетку для построения графика.

## Порядок выполнения работы

Для получения объективных результатов лабораторной работы, пригодных для сравнения различных методов пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, необходимо все эксперименты выполнять на одном и том же двигателе с включением в цепь обмотки статора одного и того же амперметра. Применение разных двигателей и амперметров, даже одного и того же типа, внесет погрешность в эксперимент, результаты которого будут фиксировать не только особенности метода пуска двигателя, но и специфические свойства различных экземпляров двигателей и измерительных механизмов амперметров. Используемый в лабораторной работе двигатель должен нормально работать при соединении обмотки статора в «треугольник».

**Пуск двигателя непосредственным включением в сеть.** Этот метод пуска отличается простотой, однако в момент подключения двигателя к сети в цепи статора возникает значительный пусковой ток, в 5–7 раз превышающий номинальный ток двигателя.

После сборки схемы по рис. 7.1 и проверки ее преподавателем следует поставить переключатель QS в положение «треугольник» и включить автомат QF. В момент включения стрелка амперметра отклонится, показывая значение начального пускового тока  $I_{п}$ ; это показание заносят в табл. 7.1. Пуск двигателя повторяют три раза, а затем определяют среднее значение начального пускового тока (А)

$$I_{п.ср} = (I_{п1} + I_{п2} + I_{п3})/3. \quad (7.1)$$

Перед каждым пуском двигателя необходимо убедиться в полной остановке ротора. Далее следует определить кратность пускового тока  $I_{п.ср}/I_{ном}$ , где  $I_{ном}$  — номинальный ток двигателя, А.

**Пуск двигателя переключением обмотки статора со звезды на «треугольник».** Схема соединений остается прежней (см. рис. 7.1). Пуск производят в следующем порядке. Поставив переключатель QS в нейтральное положение, включают автомат QF; затем переключатель QS переводят в положение «звезда» и фиксируют значения начального пускового тока  $I'_{п}$  и пускового напряжения  $U'_{п}$ . После разгона ротора переключатель быстро переводят в положение «треугольник». При этом обращают внимание на то, что «бросок» тока при переключении обмотки статора со «звезды» на «треугольник» намного меньше начального пускового тока. Пуск включением об-

Таблица 7.1

Номер пуска	$I_{п}$ , А	$I_{п.ср}$ , А	$U_{п}$ , В	$I_{п.ср}/I_{ном}$	$M_{п}$ , Н·м	$M_{п}/M_{ном}$
1						
2						
3						

Таблица 7.2

Метод пуска	Измерения		Вычисления						
	$I'_{п. ср}$ , А	$U'_п$ , В	$I'_{п. ср}$ , А	$\frac{I'_{п. ср}}{I'_{1ном}}$	$\frac{U'_п}{U_{1ном}}$	$M'_п$ , Н·м	$\frac{M'_п}{M_{2ном}}$	$\frac{I'_{п. ср}}{I'_п}$	$\frac{M'_п}{M'_п}$
Переключением обмотки статора с Y на Δ									
Реакторный									

мотки на «звезду» следует повторить три раза и определить среднее значение начального пускового тока (7.1) и его кратность  $I'_{п. ср}/I'_{1ном}$ . Результаты измерений и вычислений заносят в табл. 7.2.

**Реакторный пуск двигателя.** При реакторном пуске двигателя напряжение понижается за счет падения напряжения на индуктивном сопротивлении реакторов  $x_p$ . При этом напряжение на выводах обмотки статора (В)

$$U'_п = U_1 - jI'_п x_p. \quad (7.2)$$

Пуск двигателя выполняют следующим образом: при разомкнутом рубильнике QS (рис. 7.2) включают автомат QF и на двигатель подают пониженное напряжение  $U'_п$  (7.2), при этом фиксируют показания амперметра и вольтметра; после разгона ротора включают рубильник QS, которым шунтируются реакторы, и двигатель оказывается под полным напряжением сети. Пуск при разомкнутом рубильнике QS повторяют три раза при неподвижном роторе. Значения начального пускового тока  $I'_п$  и пускового (пониженного) напряжения на фазной обмотке статора  $U'_п$  заносят в табл. 7.2, а затем определяют среднее значение пускового тока  $I'_{п. ср}$  (7.1) и его кратность  $I'_{п. ср}/I'_{1ном}$ .

**Зависимость пускового момента от напряжения.** Собирают схему по рис. 7.3 и после проверки ее преподавателем устанавливают минимальное напряжение на выходе РНТ, вставляют в специальное отверстие диска электромагнитного тормоза (моментамера) ЭМТ шпильку, зацепляющую диск с полюсом электромагнита. После этого включают автомат QF и плавно повышают напряжение на обмотке статора  $U_{1к}$  до значения, при котором ток в обмотке статора достигнет значения

$$I_{1к} = (2,5 - 3,0)I_{1ном}$$

Таблица 7.3

Параметр	Номер измерения					
	1	2	3	4	5	6
$U_{1к}$ , В						
$M'_п$ , Н·м						

При этом через приблизительно одинаковые интервалы пускового момента  $M_{\text{п}}$  снимают не менее пяти показаний вольтметра и моментомера ЭМТ и заносят их в табл. 7.3. Измерения при значениях тока  $I_{1к} > I_{1\text{ном}}$  следует проводить по возможности быстро, не допуская чрезмерного перегрева двигателя.

По полученным данным на координатную сетку наносят точки и по лекалу через эти точки проводят плавную кривую, продолжив ее за пределы экспериментально найденных точек, т. е. экстраполируют график на участке  $AB$  (рис. 7.4) до номинального (фазного) напряжения  $U_{1\text{ном}}$  асинхронного двигателя. Из теории известно, что пусковой момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату фазного напряжения. Используя это положение, вычисляют значение пускового момента  $M_{\text{п.ном}}$ , соответствующее номинальному напряжению на обмотке статора:

$$M_{\text{п.ном}} = M_{\text{п.А}}(U_{1\text{ном}}/U_{1\text{А}})^2, \quad (7.3)$$

где  $U_{1\text{А}}$  — напряжение, соответствующее пусковому моменту  $M_{\text{п.А}}$ , т. е. наибольшему значению момента, полученному экспериментально (точка  $A$  на рис. 7.4).

Рассчитанное по (7.3) значение номинального момента должно быть равно или мало отличаться от значения момента  $M_{\text{п.В}} \approx M_{\text{п.ном}}$ , т. е. момента, полученного экстраполяцией графика (точка  $B$  на рис. 7.4), что будет свидетельствовать о правильно выполненной экстраполяции. Этот график используют для определения пусковых моментов при различных методах пуска двигателя:

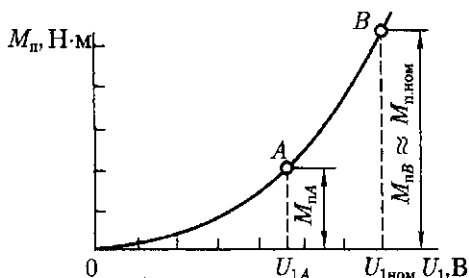
а) при пуске двигателя непосредственным включением в сеть — момент  $M_{\text{п}}$ , соответствующий номинальному фазному напряжению на обмотке статора;

б) при методах пуска двигателя с применением пониженного напряжения сети (переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник» и с включением реакторов в цепь статора) — момент  $M'_{\text{п}}$ . Затем для каждого метода пуска определяют кратность пускового момента  $M_{\text{п}} / M_{2\text{ном}}$ , где

$$M_{2\text{ном}} = 9,55 P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} \quad (7.4)$$

— номинальное значение момента на валу двигателя, Н·м;  
 $P_{\text{ном}}$  — номинальная мощность двигателя, Вт;  $n_{\text{ном}}$  — номинальная частота вращения, об/мин.

Рис. 7.4. График зависимости пускового момента асинхронного двигателя от напряжения питания



Полученные значения величин пускового момента и его кратности для метода пуска двигателя непосредственным включением в сеть заносят в табл. 7.1, а для методов пуска при пониженном напряжении — в табл. 7.2.

### **Анализ результатов лабораторной работы**

Необходимо дать сравнительную оценку пусковым свойствам асинхронного двигателя при различных методах пуска. При этом следует иметь в виду основные пусковые параметры двигателя — начальные пусковой ток и пусковой момент, полученные в результате экспериментов. При сравнении удобно воспользоваться отношениями  $I'_{п.ср}/I_{п.ср}$  и  $M'_п/M_п$ , где  $I_{п.ср}$  и  $M_п$  — начальные значения пускового тока и пускового момента при пуске двигателя непосредственным включением в сеть. Вполне очевидно, что для метода пуска непосредственным включением двигателя в сеть эти отношения равны единице, а для специальных методов пуска они меньше единицы.

При выводах о достоинствах и недостатках методов пуска необходимо учитывать еще и такие показатели, как сложность пусковой операции и ее экономичность, имея в виду стоимость дополнительных устройств.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие показатели определяют пусковые свойства асинхронных двигателей?
2. Назовите достоинства и недостатки метода пуска асинхронных двигателей непосредственным включением в сеть.
3. На чем основаны методы уменьшения пускового тока асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором? Перечислите эти методы.
4. Какой общий недостаток методов пуска асинхронных двигателей при пониженном напряжении?
5. На сколько уменьшается пусковой ток асинхронного двигателя при его пуске методом переключения обмотки статора со «звезды» на «треугольник»? Как при этом изменяется пусковой момент?
6. Как зависит пусковой момент асинхронного двигателя от напряжения, подводимого к обмотке статора?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8**

### **Исследование трехфазного асинхронного двигателя в однофазном и конденсаторном режимах**

**Цель работы.** Приобрести практические навыки в сборке схем включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть; получить экспериментальное подтверждение сведений о свойствах

трехфазного асинхронного двигателя, работающего в однофазном и конденсаторном режимах.

### Программа работы

1. Ознакомиться с конструкцией трехфазного асинхронного двигателя, записать его паспортные данные, а также данные измерительных приборов и фазосдвигающей емкости.

2. Собрать схему по рис. 8.1 и после проверки ее преподавателем снять данные для построения рабочих характеристик двигателя при его работе от трехфазной сети.

3. Снять данные для построения рабочих характеристик двигателя при его работе в однофазном режиме.

4. Снять данные для построения рабочих характеристик двигателя при его работе в конденсаторном режиме.

5. Построить рабочие характеристики двигателя для трех режимов его работы.

6. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал [5]: принцип действия однофазного асинхронного двигателя; пуск однофазного асинхронного

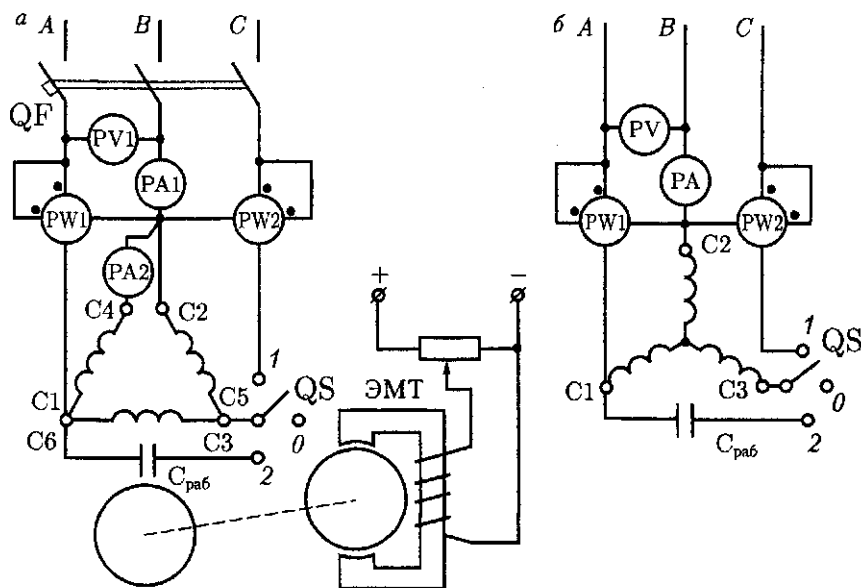


Рис. 8.1. Схемы включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть



двигателя, сравнение свойств фазосдвигающих элементов; конденсаторные асинхронные двигатели; рабочая и пусковая емкости; использование трехфазного асинхронного двигателя для работы от однофазной сети.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицу для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков рабочих характеристик.

### Порядок выполнения работы

Для исследования асинхронного двигателя во всех трех режимах используют трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором общепромышленного назначения мощностью не более 600 Вт. Это целесообразно, во-первых, потому, что на практике обычно возникает потребность применения трехфазного двигателя в однофазном или конденсаторном режиме именно такой мощности, во-вторых, при небольшой мощности двигателя емкость рабочего конденсатора невелика и обычно составляет 5–20 мкФ (в зависимости от мощности двигателя и напряжения питания) и, наконец, в-третьих, при такой мощности двигателя схема соединений не усложняется измерительными трансформаторами тока.

Если в трехфазном режиме работы обмотки статора двигателя должны соединяться в «треугольник», то следует воспользоваться схемой, представленной на рис. 8.1, а. Здесь для измерения активной мощности  $P_1$ , потребляемой двигателем, служат два одноэлементных ваттметра PW1 и PW2. В трехфазном режиме потребляемая двигателем мощность  $P_1$  равна сумме показаний ваттметров ( $P_1 = P'_1 + P''_1$ ). В однофазном и конденсаторном режимах ваттметр PW2 оказывается отключенным и мощность  $P_1$  определяется показанием ваттметра PW1, т.е.  $P_1 = P'_1$ . В рассматриваемой схеме применены два амперметра: PA1 для измерения линейного тока  $I_1$  и PA2 для измерения тока в фазной обмотке двигателя  $I_{1\phi}$ .

Если же в трехфазном режиме двигателя обмотки статора должны соединяться «звездой», то применяется схема соединений, представленная на рис. 8.1, б, в которой использован такой же комплект измерительных приборов, как и в схеме, показанной на рис. 8.1, а, но с одним амперметром.

**Исследование двигателя в трехфазном режиме.** Собирают схему соединений по рис. 8.1, а и после проверки ее преподавателем ставят переключатель QS в положение 1, при котором двигатель становится трехфазным, и включают автомат QF, подключающий двигатель к сети. После этого, постепенно нагружая двигатель электромагнитным тормозом ЭМТ, доводят нагрузочный момент до значения, при котором ток в фазной обмотке двигателя достигнет значения  $I_{\phi 1} = 1,2I_{1ном}$ , где  $I_{1ном}$  — номинальное значение фазного тока двигателя. При этом через примерно одинаковые интервалы

Таблица 8.1

Режим работы	Номер измерения и вычисления	Измерения							Вычисления			
		$U_1, В$	$I_1, А$	$I_{\phi 1}, А$	$P_1', Вт$	$P_1'', Вт$	$n, об/мин$	$M_1, Н \cdot м$	$P_1, Вт$	$P_2, Вт$	$\cos \varphi_1$	$\eta, \%$
Трехфазный	1											
	2											
	3											
	4											
	5											
Однофазный	1											
	5											
Конденсаторный	1											
	5											

тока нагрузки  $I_{\phi 1}$ , например  $I_{\phi 1} = I_{\phi 10}$ ;  $I_{\phi 1} = 0,5 I_{1ном}$ ;  $I_{\phi 1} = 0,75 I_{1ном}$ ;  $I_{\phi 1} = I_{1ном}$ ;  $I_{\phi 1} = 1,2 I_{1ном}$ , снимают показания приборов и заносят их в табл. 8.1.

Затем выполняют расчеты:  
коэффициент мощности

$$\cos \varphi_1 = P_1 / (3 U_1 / I_{\phi 1}); \quad (8.1)$$

полезная мощность двигателя (Вт)

$$P_2 = 0,105 M_2 n_2, \quad (8.2)$$

где  $M_2$  — нагрузочный момент, Н · м;

КПД двигателя (%)

$$\eta = (P_2 / P_1) 100. \quad (8.3)$$

**Однофазный и конденсаторный режимы двигателя.** Для исследования двигателя в *однофазном* режиме необходимо поставить переключатель QS в положение 2, включить двигатель в сеть и по окончании процесса пуска перевести переключатель QS в нейтральное положение. При этом двигатель будет работать как однофазный.

Для получения данных, необходимых для построения рабочих характеристик, двигатель нагружают посредством ЭМТ до тока нагрузки в фазной обмотке  $I_{1\phi} = 1,2 I_{1ном}$ . При этом через определенные интервалы тока  $I_{1\phi}$  снимают показания приборов, делают необходимые вычисления и полученные значения величин заносят в табл. 8.1. При этом коэффициент мощности двигателя

$$\cos \varphi_1 = P_1 / (U_1 I_1), \quad (8.4)$$

где  $P_1$  — мощность, потребляемая двигателем в однофазном режиме, Вт, определяется по показанию ваттметра PW1, т.е.  $P_1 = P'_1$ ;  $I_1$  — ток в линейном проводе, А.

Полезную мощность двигателя определяют по (8.2), а КПД — по (8.3).

Для исследования двигателя в *конденсаторном* режиме необходимо переключатель QS поставить в положение 2 и после пуска двигателя оставить его в том же положении. Порядок проведения опыта такой же, что и в однофазном режиме.

**Построение рабочих характеристик.** Рабочие характеристики двигателя для всех трех режимов работы строят по данным табл. 8.1. При этом графики, предназначенные для сравнения между собой величин  $P_2$ ,  $\cos \varphi_1$ ,  $n_2$  и  $\eta$ , строят в функции фазного тока  $I_{1\phi}$ . Для удобства графики одноименных (сравниваемых) величин всех трех режимов работы асинхронного двигателя строят в одних осях координат. На каждом из графиков проводят ординату при  $I_{1\phi} = I_{1\text{ном}}$  и отмечают на характеристиках номинальные значения величин.

### Анализ результатов лабораторной работы

Сначала сравнивают номинальные значения полезной мощности, коэффициента мощности и КПД двигателя в трехфазном режиме с его паспортными данными и делают заключение о соответствии результатов исследования этим данным.

Затем сравнивают одноименные рабочие характеристики двигателя во всех трех режимах работы и дают объяснение причинам, вызвавшим расхождение этих характеристик; определяют относительную величину того или иного параметра двигателя в однофазном и конденсаторном режимах по сравнению с соответствующим параметром в трехфазном режиме работы двигателя. Например, определяют активную мощность в однофазном и конденсаторном режимах двигателя в процентном отношении к номинальной мощности  $P_{\text{ном}}$  в трехфазном режиме:

$$P'_{2\text{одн}} = (P_{2\text{одн}} / P_{\text{ном}}) 100; \quad P'_{2\text{кон}} = (P_{2\text{кон}} / P_{\text{ном}}) 100. \quad (8.5)$$

После этого объясняют причины расхождения одноименных параметров двигателя в однофазном и конденсаторном режимах.

### Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы однофазного асинхронного двигателя.
2. Почему в однофазном двигателе пусковой момент равен нулю?
3. Каковы условия возникновения вращающегося магнитного поля статора в двигателе с двухфазной обмоткой на статоре?
4. В каких случаях вращающееся поле статора является круговым, а в каких — эллиптическим?

5. Когда в качестве фазосдвигающего элемента используют активное сопротивление, а когда — емкость?

6. В чем конструктивная разница между однофазным и конденсаторным двигателями?

7. Для какого режима нагрузки конденсаторного двигателя подбирают рабочую емкость? Изменятся ли рабочие свойства этого двигателя, если он будет работать в другом режиме нагрузки?

8. С какой целью в цепь конденсаторного двигателя включают пусковую емкость и как ее включают?

9. В каком из режимов, однофазном или конденсаторном, лучше рабочие свойства асинхронного двигателя?

10. Какие схемы включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть получили наибольшее применение?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

### Исследование индукционного регулятора

**Цель работы.** Приобрести практические навыки по сборке схемы индукционного регулятора и получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах индукционного регулятора.

#### Программа работы

1. Ознакомиться с конструкцией индукционного регулятора; записать паспортные данные регулятора и измерительных приборов.

2. Собрать схему по рис. 9.1 и после проверки ее преподавателем провести опыт холостого хода индукционного регулятора, при этом снять данные и построить график зависимости напряжения на выходе индукционного регулятора от угла поворота ротора; по данным опыта начертить векторную диаграмму напряжений и построить график зависимости  $U_{20} = f(\alpha p)$ .

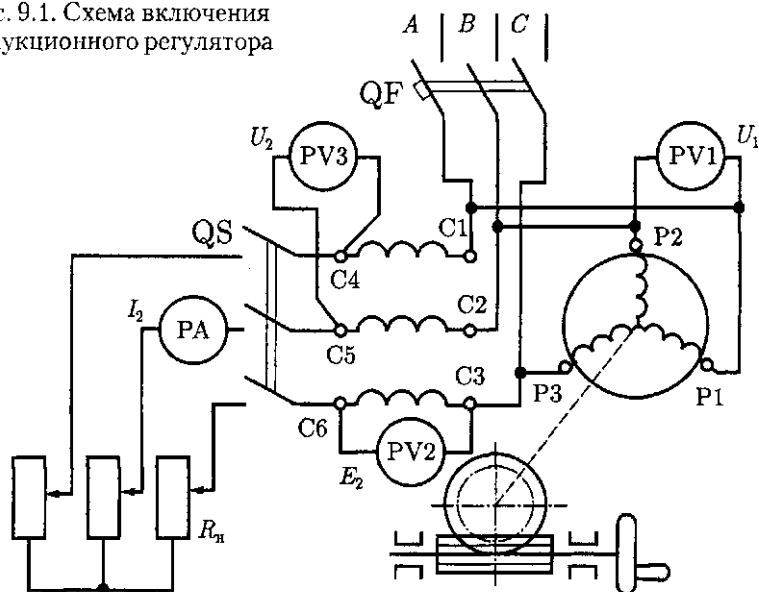
3. Снять показания приборов и построить внешнюю характеристику индукционного регулятора; определить номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки.

4. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

#### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал [5]: устройство и принцип действия индукционного регулятора; векторная диаграмма напряжений; зависимость напряжения на выходе индукционного регулятора от угла поворота ротора; внешняя характеристика индукционного регулятора.

Рис. 9.1. Схема включения индукционного регулятора



2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

### Порядок выполнения работы

Индукционный регулятор представляет собой заторможенную асинхронную машину с фазным ротором. При этом ротор машины заторможен посредством червячной передачи, позволяющей вращением маховика плавно поворачивать ротор.

Индукционный регулятор предназначен для плавной регулировки напряжения в схемах переменного тока. На рис. 9.1 представлена схема включения индукционного регулятора, из которой видно, что обмотки статора и ротора имеют автотрансформаторную связь. При этом обмотки статора разомкнуты, а обмотки ротора соединены звездой. Возможна также схема, когда разомкнутыми являются обмотки ротора.

При включении индукционного регулятора в сеть напряжением  $U_1$  токи в обмотке ротора создают вращающееся магнитное поле, которое, сцепляясь с обмотками ротора и статора, наводит в них ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  соответственно. ЭДС ротора  $E_2$  находится в противофазе с напряжением сети и уравнивает его:  $E_1 \approx -U_1$ . ЭДС статора  $E_2$  взаимодействует с напряжением сети и создает на выходе индукционного регулятора напряжение (В)

$$\dot{U}_{20} = \dot{U}_1 + \dot{E}_2 \cos \alpha, \quad (9.1)$$

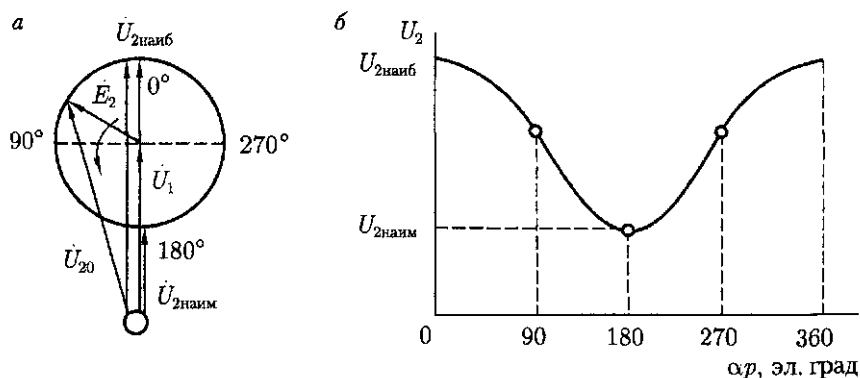


Рис. 9.2. Векторная диаграмма напряжений (а) и зависимость  $U_2 = f(\alpha p)$  (б) индукционного регулятора

где  $\alpha$  — угол поворота ротора относительно его положения, при котором  $E_2$  и  $U_1$  совпадают по фазе и напряжение  $U_{20}$  имеет наибольшее значение  $E_{2\text{наиб}}$ . Уравнение (9.1) иллюстрируется векторной диаграммой напряжений индукционного регулятора, построенной для одной фазы в режиме холостого хода (рис. 9.2, а). Задаваясь значениями угла поворота  $\alpha$ , можно по (9.1) определить напряжение на выходе индукционного регулятора для любого положения ротора. Так, при  $\alpha = 90^\circ$  напряжение  $U_{20} = U_1$ , так как  $\cos 90^\circ = 0$ , а при  $\alpha = 180^\circ$  напряжение  $U_{20} = U_1 - E_2 = U_{2\text{наим}}$ , так как  $\cos 180^\circ = -1$ .

Таким образом, при повороте ротора на угол от  $0$  до  $180^\circ$  напряжение на выходе индукционного регулятора изменяется от  $U_{2\text{наиб}}$  до  $U_{2\text{наим}}$ .

Если обмотки индукционного регулятора имеют одну пару полюсов ( $p = 1$ ), то геометрические градусы угла поворота ротора  $\alpha$  соответствуют электрическим градусам поворота вектора ЭДС  $E_2$ . Если же обмотки регулятора многополюсные ( $p = 2, 4, 6$  и т. д.), то 1 геом. град содержит  $p$  эл. град ( $\alpha_{\text{эл}} = \alpha_{\text{геом}} p$ ), т. е. повороту ротора на 1 геом. град соответствует поворот вектора ЭДС  $E_2$  на  $p$  эл. град. Поэтому уравнение (9.1) справедливо лишь для двухполюсного регулятора ( $p = 1$ ), а в общем случае уравнение напряжений для индукционного регулятора имеет вид (В)

$$\dot{U}_{20} = \dot{U}_1 + \dot{E}_2 \cos(\alpha p), \quad (9.2)$$

где  $\alpha$  — геометрический угол поворота ротора, град.

**Опыт холостого хода.** Собирают схему по рис. 9.1 и после проверки ее преподавателем автоматом QF подключают индукционный регулятор к сети на номинальное напряжение. При этом нагрузка должна быть отключена, т. е. рубильник QS разомкнут. Затем, поворачивая ротор индукционного регулятора посредством маховика,

Таблица 9.1

$\alpha$ , геом. град	0	22,5	45	67,5	90	112,5	135	180
$\alpha p$ , эл. град	0	45	90	135	180	225	270	360
$U_{20}$ , В								
$U_{2расч}$ , В								

находят такое его положение, при котором напряжение на выходе регулятора  $U_{20} = U_{2наиб}$ . Это положение принимают за исходное, т. е. считают, что угол  $\alpha p = 0$ . Измеряют напряжение на входе регулятора  $U_1$  (вольтметр PV1), ЭДС на статоре  $E_2$  (вольтметр PV2) и напряжение на выходе регулятора  $U_{20}$  (вольтметр PV3). Полученные значения величин должны удовлетворять уравнению  $U_2 = U_1 + E_2$ .

Затем снимают данные для построения графика  $U_{20} = f(\alpha p)$ . С этой целью плавно поворачивают ротор и через каждые  $\alpha p = 45$  эл. град угла поворота измеряют напряжение  $U_{20}$  на выходе регулятора. Всего делают восемь измерений, повернув ротор на  $(360/p)$  геом. град. Например, если обмотки регулятора четырехполюсные ( $p = 2$ ), то напряжение  $U_{20}$  измеряют через каждые  $45/2 = 22,5$  геом. град поворота ротора, а результирующий угол поворота ротора за весь опыт составит  $360/2 = 180^\circ$ . Полученные данные заносят в табл. 9.1.

По этим данным строят график  $U_{20} = f(\alpha p)$  для режима холостого хода регулятора. На этой же координатной сетке строят график  $U_{2расч} = f(\alpha p)$ , где  $U_{2расч}$  — напряжение на выходе регулятора, полученное в результате расчета по (9.2). Примерный вид этого графика показан на рис. 9.2, б.

**Внешняя характеристика.** Установив на выходе индукционного регулятора напряжение  $U_{20} = 220$  В, к нему подключают нагрузку (включают рубильник QS). Постепенно увеличивая ее, снимают показания приборов через приблизительно одинаковые интервалы тока нагрузки  $I_2$  и заносят их в табл. 9.2.

Всего выполняют не менее пяти измерений, при этом первое измерение делают в режиме холостого хода, а предпоследнее — при номинальной нагрузке. По данным табл. 9.2 строят внешнюю характеристику индукционного регулятора  $U_2 = f(I_2)$  при активной

Таблица 9.2

Параметр	Номер измерения				
	1	2	3	4	5
$I_2/I_{2ном}$	0	0,5	0,75	1,0	1,2
$I_2$ , А					
$U_2$ , В					

нагрузке ( $\cos \varphi_2 = 1$ ). Затем определяют номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_{2ном}}{U_{20}} 100, \quad (9.3)$$

где  $U_{2ном}$  — напряжение на выходе регулятора при номинальной нагрузке.

### **Анализ результатов лабораторной работы**

При анализе результатов сравнивают графики зависимости напряжения на выходе индукционного регулятора от угла поворота ротора  $U_2 = f(\alpha p)$ , полученные опытным путем и в результате расчета по (9.2). При этом объясняют физический смысл причин, вызвавших расхождение этих графиков. Для количественной оценки расхождения графиков определяют наибольшую относительную погрешность регулятора (%)

$$\gamma = \frac{U_{2оп} - U_{2расч}}{U_{2оп}} 100, \quad (9.4)$$

где  $U_{2оп}$  и  $U_{2расч}$  — напряжения на выходе регулятора, полученные опытным и расчетным путем при значении угла  $\alpha p$ , соответствующем наибольшему расхождению этих напряжений, В.

Анализируя внешнюю характеристику регулятора, указывают причины, вызвавшие изменение напряжения на выходе регулятора при возрастании нагрузки.

#### **Контрольные вопросы**

1. Объясните устройство индукционного регулятора.
2. Почему поворот ротора вызывает изменение напряжения на выходе индукционного регулятора?
3. Сколько раз за один оборот ротора напряжение на выходе шестиполюсного индукционного регулятора достигнет наибольшего значения?
4. Какой вид имеют внешние характеристики индукционного регулятора при активной, активно-индуктивной и активно-емкостной видах нагрузки?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10**

### **Исследование асинхронного исполнительного двигателя**

**Цель работы.** Приобрести практические навыки в сборке схемы и регулировке асинхронного исполнительного двигателя при амплитудном и амплитудно-фазовом способах управления; полу-



читать экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах асинхронных исполнительных двигателей при указанных способах управления.

### Программа работы

1. Ознакомиться с конструкцией двигателя, записать его паспортные данные, данные измерительных приборов и регуляторов напряжения.

2. Собрать схему по рис. 10.1 и после проверки ее преподавателем произвести пробный пуск двигателя и его реверсирование; проверить отсутствие самохода и измерить напряжение трогания.

3. Снять показания приборов и построить механические характеристики двигателя при амплитудном и амплитудно-фазовом способах управления; определить нелинейность механических характеристик.

4. Снять показания приборов и построить регулировочные характеристики двигателя при амплитудном и амплитудно-фазовом

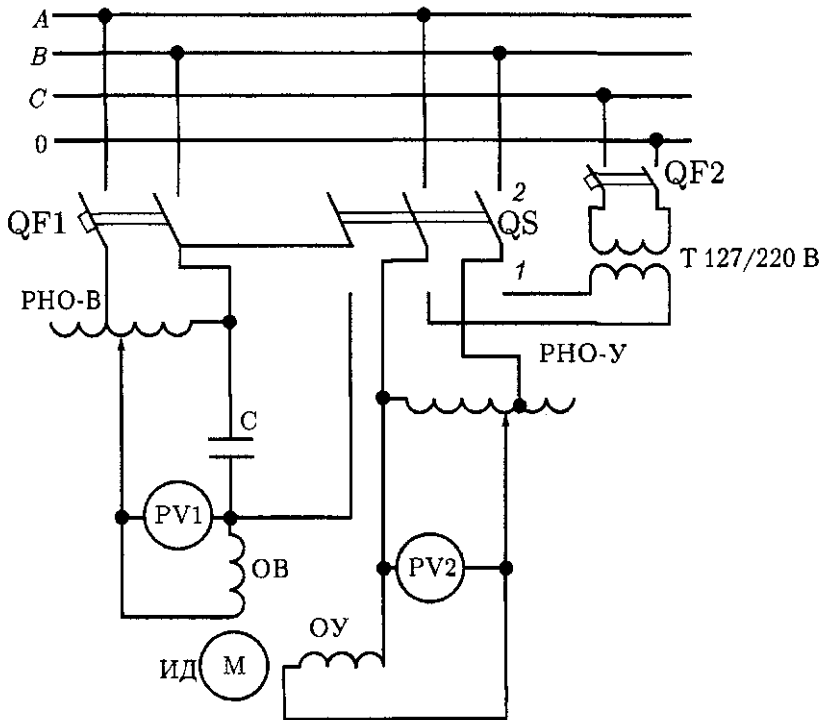


Рис. 10.1. Схема включения асинхронного исполнительного двигателя

способах управления; определить нелинейность регулировочных характеристик.

5. Используя данные двигателя, полученные в п. 3, рассчитать параметры и построить графики зависимости полезной мощности двигателя от частоты вращения.

6. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал [7]: назначение асинхронных исполнительных двигателей и способы их управления; самоход и пути его устранения; асинхронный исполнительный двигатель с полым немагнитным ротором; механические и регулировочные характеристики двигателя при различных способах управления; зависимость полезной механической мощности асинхронного исполнительного двигателя от частоты вращения.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

### Порядок выполнения работы

Асинхронные исполнительные двигатели применяются в устройствах автоматики в качестве исполнительного органа, т.е. для преобразования электрических сигналов в механическое перемещение.

На статоре исполнительного двигателя (ИД) имеются две обмотки, сдвинутые в пространстве относительно друг друга на 90 эл. град. Одна обмотка — *обмотка возбуждения* (ОВ) — постоянно находится под напряжением. На другую, называемую *обмоткой управления* (ОУ), напряжение (электрический сигнал) подается лишь при необходимости вызвать вращение вала двигателя.

Вращающий момент, развиваемый асинхронным исполнительным двигателем, зависит от напряжения (напряжения управления)  $U_y$ , поданного на обмотку управления, и его фазового сдвига  $\beta$  относительно напряжения на обмотке возбуждения.

Существует три способа управления асинхронными исполнительными двигателями:

1) *амплитудное* — изменение величины (амплитуды) напряжения управления  $U_y$  при неизменной его фазе  $\beta$ ;

2) *фазовое* — изменение фазы напряжения управления  $\beta$  при неизменной его величине;

3) *амплитудно-фазовое* — одновременное изменение величины (амплитуды) напряжения управления и его фазы.

Наибольшее практическое применение получили два способа управления — амплитудное и амплитудно-фазовое. Эти способы управления исследуются в данной лабораторной работе.

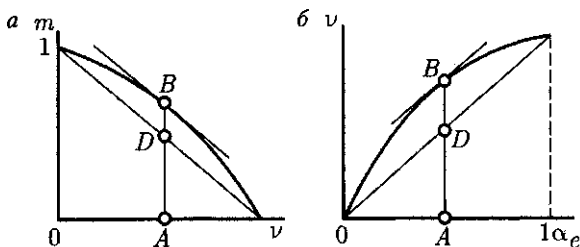


Рис. 10.2. Определение нелинейности механической (а) и регулировочной (б) характеристик асинхронного исполнительного двигателя

Помимо общих требований (минимальные габариты, масса и стоимость, высокий КПД и т. д.) к асинхронным исполнительным двигателям предъявляются некоторые специфические требования: широкий диапазон регулирования частоты вращения, отсутствие самохода, малоинерционность, прямолинейность механических и регулировочных характеристик. Последнее требование в асинхронном ИД полностью не может быть выполнено, т. е. характеристики этого двигателя всегда отличаются от прямолинейных, поэтому при оценке свойств асинхронного исполнительного двигателя вводят понятие «нелинейность характеристики».

*Нелинейность механической характеристики (%)*

$$\Delta m = (\overline{DB} / \overline{AB})100. \quad (10.1)$$

Для определения отрезков  $\overline{DB}$  и  $\overline{AB}$  (рис. 10.2, а) проводят прямую, соединяющую точки пересечения механической характеристики с осями координат, а затем параллельно этой прямой проводят касательную к механической характеристике и получают точку В. Из этой точки опускают перпендикуляр ВА на ось абсцисс и получают искомые отрезки  $\overline{DB}$  и  $\overline{AB}$ .

*Нелинейность регулировочной характеристики  $\Delta v$*  (рис. 10.2, б) определяют по выражению, аналогичному (10.1)

$$\Delta v = (\overline{DB} / \overline{AB})100.$$

Известно, что для получения в двухфазном двигателе вращающегося магнитного поля необходим фазовый сдвиг между токами в обмотке возбуждения (ОВ) и в обмотке управления (ОУ). При пространственном сдвиге осей этих обмоток в 90 эл. град желательно, чтобы фазовый сдвиг между токами составлял  $\beta = 90^\circ$ .

При амплитудном способе управления исполнительным двигателем это достигается путем включения его обмоток на напряжения, сдвинутые по фазе относительно друг друга на  $90^\circ$ . Для получения таких напряжений существует несколько способов. Наиболее простой из них — использование трехфазной сети с нулевым проводом. При этом цепь обмотки ОВ подключают к линейным проводам А и В на напряжение  $U_{AB}$ , а цепь обмотки ОУ — к линейному проводу С и

нулевому проводу  $0$  на фазное напряжение  $U_C$  (см. рис. 10.1). Фазовый сдвиг между векторами этих напряжений составляет  $90^\circ$  (рис. 10.3).

При амплитудно-фазовом способе управления ИД фазовый сдвиг между напряжениями  $U_B$  и  $U_Y$  создается конденсатором  $C$  в цепи обмотки  $OB$  (см. рис. 10.1). Емкость этого конденсатора в асинхронном ИД выбирается такой, чтобы обеспечить фазовый сдвиг  $\beta = 90^\circ$  при пуске двигателя. При этом следует помнить, что при других режимах работы двигателя фазовый сдвиг отличается от  $90^\circ$ .

**Схема соединений.** На рис. 10.1 представлена схема включения асинхронного исполнительного двигателя. В схеме применены два однофазных регулировочных автотрансформатора (РНО-В и РНО-У), позволяющие осуществлять независимую регулировку напряжения как в цепи  $OB$ , так и в цепи  $OY$ .

Переключение ИД с амплитудного управления на амплитудно-фазовое осуществляется переключателем  $QS$ : положение  $1$  этого переключателя соответствует амплитудному управлению двигателя (конденсатор  $C$  зашунтирован, а цепь управления подключена на фазное напряжение  $U_C$ ); при положении  $2$  переключателя управление двигателя амплитудно-фазовое (цепь управления подключена параллельно цепи возбуждения на линейное напряжение  $U_{AB}$ , а последовательно обмотке возбуждения включен конденсатор  $C$ ).

Для получения одинаковых напряжений на входах РНО-В и РНО-У в схему включают повышающий трансформатор  $T$ , увеличивающий фазное напряжение  $U_C$  в  $\sqrt{3}$  раз.

Собирают схему по рис. 10.1 и после проверки ее преподавателем осуществляют пробный пуск двигателя. Для этого рукоятки регуляторов РНО-В и РНО-У ставят в положение минимального напряжения, включают автоматы  $QF1$  и  $QF2$ , а переключатель  $QS$  ставят в положение  $1$  (амплитудное управление). Затем регулятором РНО-В устанавливают номинальное напряжение на обмотке возбуждения, а напряжение управления постепенно повышают регулятором РНО-У до номинального значения, наблюдая за нарастающей частотой вращения ИД. После этого, вернув рукоятки РНО-У и РНО-В в нулевое положение, переключатель  $QS$  переводят в положение  $2$  (амплитудно-фазовое управление), устанавливают регулятором РНО-В номинальное напряжение возбуждения и постепенно повышают напряжение управления.

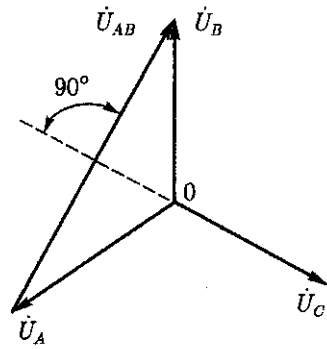


Рис. 10.3. Векторная диаграмма напряжений трехфазной сети с нулевым проводом

Для изменения направления вращения двигателя (реверса) следует поставить переключатель QS в нейтральное положение, поменять местами провода, присоединяемые к выводам обмотки управления, и включить двигатель, поставив переключатель QS в положение 1 или 2.

**Проверка отсутствия самохода и определение напряжения трогания ИД.** Для проверки отсутствия технологического самохода (вызванного возможным коротким замыканием части витков в обмотках статора, асимметрией магнитной системы двигателя или замыканием некоторой части пластин магнитопровода) включают в сеть обмотку возбуждения (ОВ) двигателя, установив на ней номинальное напряжение. Обмотка управления (ОУ) при этом должна быть отключенной (переключатель QS находится в нейтральном положении). Если при этом ротор ИД остается неподвижным, то это свидетельствует об отсутствии технологического самохода.

Затем проверяют отсутствие в двигателе параметрического самохода, обусловленного недостаточным активным сопротивлением ротора. С этой целью включают в сеть обе обмотки статора и с помощью РНО-В и РНО-У устанавливают номинальные напряжения на обмотках возбуждения и управления и после достижения двигателем установившейся частоты вращения регулятором РНО-У уменьшают до нуля напряжение управления. При этом ротор двигателя должен остановиться (параметрический самоход отсутствует).

Под *напряжением трогания* понимают такое минимальное напряжение в цепи обмотки управления ( $U_{y,тр}$ ), при котором ротор двигателя начинает вращаться. Напряжение на обмотке возбуждения при этом должно быть номинальным. Опыт проводят в таком порядке. Включив автомат QF1 и поставив переключатель QS в положение 1 (амплитудное управление), устанавливают посредством РНО-В номинальное напряжение возбуждения и регулятором РНО-У постепенно повышают напряжение на ОУ от нуля до некоторого значения  $U_{y,тр}$ , при котором начнется вращение ротора двигателя. Так как обычно напряжение трогания невелико, то при этом опыте применяют вольтметр PV2 с небольшим пределом измерения — (0,10–0,15)  $U_{y,ном}$ . Для получения более точного результата опыт повторяют три раза, результаты измерений заносят в табл. 10.1 и определяют среднее значение напряжения трогания (В)

$$U_{y,тр,ср} = (U_{y,тр1} + U_{y,тр2} + U_{y,тр3})/3. \quad (10.2)$$

Таблица 10.1

Способы управления	$U_{y,тр1}$ , В	$U_{y,тр2}$ , В	$U_{y,тр3}$ , В	$U_{y,тр,ср}$ , В
Амплитудное				
Амплитудно-фазовое				

Затем переключатель QS ставят в положение 2 (амплитудно-фазовое управление) и опыт повторяют.

**Механические характеристики.** Данные, необходимые для построения механических характеристик ИД, снимают следующим образом. Включают двигатель в сеть при амплитудном способе управления (переключатель QS ставят в положение 1), устанавливают номинальные напряжения на обмотках ОВ и ОУ и посредством электромагнитного или маятникового тормоза затормаживают ротор двигателя. При этом измеряют начальный пусковой момент  $M_n$  при  $n_2 = 0$ . Затем постепенно уменьшают нагрузочный момент до режима холостого хода ( $M_2 = 0$ ) и через приблизительно одинаковые интервалы этого момента измеряют частоту вращения двигателя. Всего делают не менее пяти измерений и показания приборов заносят в табл. 10.2.

Затем переключатель QS переводят в положение 2 и в таком же порядке снимают данные механической характеристики при амплитудно-фазовом способе управления ИД. Полученные опытным путем значения момента и частоты вращения пересчитывают в относительных единицах:

$$m = M_2/M_n; \quad (10.3)$$

$$\nu = n_2/n_1. \quad (10.4)$$

где  $M_n$  — начальный пусковой момент, Н·м;

$$n_1 = f_1 60/p \quad (10.5)$$

— синхронная частота вращения, об/мин;  $p$  — число пар полюсов в обмотках статора.

Полученные относительные значения величин заносят в табл. 10.2 и строят механические характеристики асинхронного исполнительного двигателя  $m = f(\nu)$  при номинальном напряжении управления, а затем определяют их нелинейность  $\Delta m$ .

**Регулировочные характеристики.** Данные, необходимые для построения регулировочных характеристик ИД при амплитудном управлении, снимают в режиме холостого хода ( $M_2 = 0$ ), поставив переключатель QS в положение 1. Для этого устанавливают в цепи возбуждения номинальное напряжение возбуждения  $U_b$  и с помо-

Таблица 10.2

Параметр	Способы управления							
	Амплитудное				Амплитудно-фазовое			
$M_2$ , Н·м								
$n_2$ , об/мин								
$m$								
$\nu$								

Таблица 10.3

Параметр	Способы управления							
	Амплитудное				Амплитудно-фазовое			
$U_y, В$								
$n_2, об/мин$								
$\alpha_c$								
$\nu$								

щью РНО-У постепенно повышают напряжение управления от нуля до номинального значения. Одновременно измеряют частоту вращения двигателя  $n_2$ . Делают не менее пяти замеров приблизительно через одинаковые интервалы напряжения управления и их результаты заносят в табл. 10.3.

Затем переключатель QS ставят в положение 2 и в таком же порядке снимают данные для построения регулировочных характеристик при амплитудно-фазовом управлении ИД.

Относительное значение эффективного коэффициента сигнала

$$\alpha_c = kU_y/U_B, \quad (10.6)$$

где  $k$  — коэффициент трансформации обмоток возбуждения и управления (его значение указано в паспортных данных двигателях). Относительную частоту вращения определяют по (10.4).

По полученным значениям относительных величин строят регулировочные характеристики двигателя  $\nu = f(\alpha_c)$  и определяют их нелинейность  $\Delta\nu$ .

**Зависимость полезной механической мощности двигателя от частоты вращения.** Используя данные, приведенные в табл. 10.2, определяют полезную механическую мощность двигателя (Вт)

$$P_2 = 0,105 M_2 n_2. \quad (10.7)$$

Результаты вычислений заносят в табл. 10.4.

Таблица 10.4

Параметр	Способы управления							
	Амплитудное				Амплитудно-фазовое			
$\nu$								
$P_2, Вт$								

### Анализ результатов лабораторной работы

Анализ результатов лабораторной работы состоит главным образом в сравнении свойств асинхронного исполнительного двига-

Таблица 10.5

Способы управления	$U_{тр}$ , В	$M_{п}$ , Н·м	$\Delta m$ , %	$\Delta \nu$ , %	$P_{2наиб}$ , Вт
Амплитуднос					
Амплитудно-фазовое					

теля при амплитудном и амплитудно-фазовом способах управления. При этом сравнивают следующие параметры: напряжение трогания  $U_{тр}$ , начальный пусковой момент  $M_{п}$ , нелинейность механических и регулировочных характеристик  $\Delta m$ , наибольшее значение полезной механической мощности  $P_{2наиб}$ . Для удобства сравнения перечисленных параметров следует заполнить табл. 10.5.

Отмечая достоинства или недостатки способа управления по какому-либо параметру, необходимо физически обосновать расхождение параметров. При окончательной оценке преимуществ того или иного способа управления асинхронным исполнительным двигателем необходимо также иметь в виду сложность схемы соединений и наличие в ней дополнительных устройств.

### **Контрольные вопросы**

1. Каково назначение исполнительных двигателей?
2. Какие существуют способы управления асинхронными исполнительными двигателями и по каким принципиальным схемам они реализуются?
3. Какие виды самохода возможны в асинхронном ИД?
4. С какой целью асинхронные ИД выполняют с повышенным активным сопротивлением ротора?
5. Как устроен асинхронный двигатель с полым немагнитным ротором?
6. Объясните устройство асинхронного двигателя «сквозной» конструкции.
7. Что такое напряжение трогания и как его определить?
8. Из каких соображений выбирают величину емкости конденсатора в цепи обмотки возбуждения при амплитудно-фазовом управлении асинхронным ИД?
9. Какие значения принимаются за базовые при расчете относительного момента и относительной частоты вращения?

## Глава 3

### СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

#### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

#### Исследование трехфазного синхронного генератора

**Цель работы.** Изучить устройство синхронного генератора и приобрести практические навыки в сборке схем и снятии характе-



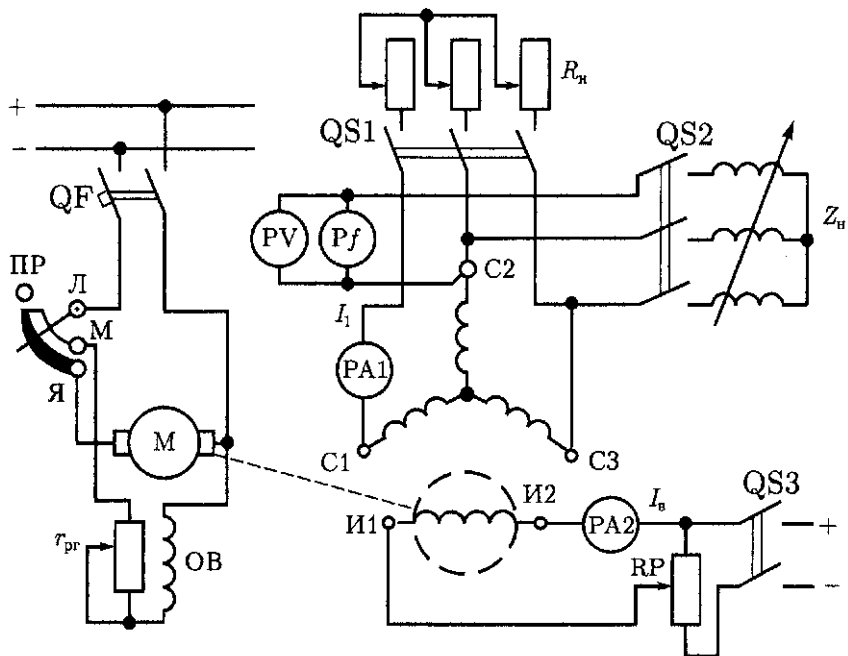


Рис. 11.1. Схема включения трехфазного синхронного генератора

ристик; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах синхронного генератора.

### Программа работы

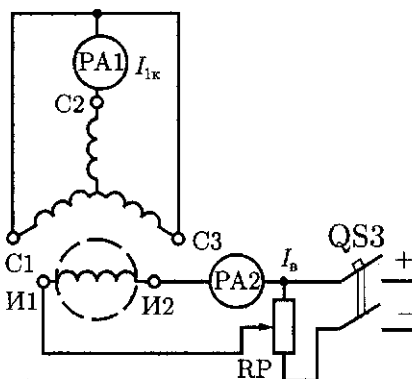
1. Ознакомиться с конструкцией синхронного генератора и приводного двигателя; записать их паспортные данные и данные измерительных приборов.
2. Собрать схему по рис. 11.1 и после проверки ее преподавателем произвести пробный пуск генератора, проверить возможность регулирования параметров генератора.
3. Снять показания приборов и построить характеристику холостого хода генератора, сравнив ее с нормальной характеристикой холостого хода синхронной машины.
4. Снять данные и построить внешние характеристики генератора при активной ( $\cos \varphi_1 = 1$ ) и активно-индуктивной ( $\cos \varphi_1 < 1$ ) видах нагрузки; определить номинальное изменение напряжения генератора при сбросе нагрузки.
5. Снять данные и построить регулировочные характеристики генератора при активной ( $\cos \varphi_1 = 1$ ) и активно-индуктивной

Рис. 11.2. Схема включения трехфазного синхронного генератора при опыте короткого замыкания

( $\cos \varphi_1 < 1$ ) нагрузках; определить номинальное изменение тока возбуждения.

6. Собрать схему трехфазного короткого замыкания по рис. 11.2 и после проверки ее преподавателем снять данные и построить характеристику короткого замыкания генератора; определить величину отношения короткого замыкания генератора.

7. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.



### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал [5]: типы синхронных генераторов, их устройство и способы возбуждения; реакции якоря синхронного генератора при активной, индуктивной, емкостной и смешанной нагрузках; характеристики холостого хода, короткого замыкания, внешние и регулировочные; номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки и номинальное изменение тока возбуждения; отношение короткого замыкания синхронного генератора; потери и КПД синхронной машины.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

### Порядок выполнения работы

**Схема соединений.** На рис. 11.1 представлена схема соединений синхронного генератора. Для привода генератора применен двигатель постоянного тока параллельного возбуждения. Свойства этого двигателя позволяют путем изменения тока в обмотке возбуждения ОВ с помощью регулировочного реостата  $r_{рr}$  стабилизировать частоту вращения так, чтобы она при любой нагрузке генератора оставалась неизменной и равной синхронной частоте вращения.

Пуск двигателя осуществляют следующим образом: ставят рукоятку пускового реостата ПР в положение «Пуск», а движок регулировочного реостата  $r_{рr}$  — в положение, соответствующее его минимальному сопротивлению; затем включают автомат QF и медленно переводят рычаг ПР в положение «Работа». Затем движок реостата  $r_{рr}$  ставят в положение, соответствующее синхронной частоте вращения. После включения цепи возбуждения генератора рубиль-

Таблица 11.1

Намагничивание					Размагничивание				
Номер измерения	$I_b$ , А	$E_0$ , В	$I_{b^*}$ , А	$E_{0^*}$ , В	Номер измерения	$I_b$ , А	$E_0$ , В	$I_{b^*}$ , А	$E_{0^*}$ , В

ником QS3 контроль за частотой вращения удобно вести по показанию частотомера  $Pf$ , показание которого не должно отличаться от номинальной частоты тока в обмотке статора, например 50 Гц.

Для остановки двигателя необходимо отключить автомат QF и поставить рычаг ПР в положение «Пуск».

После сборки схемы (рис. 11.1) и проверки ее преподавателем выполняют пробный пуск генератора. Для этого пускают приводной двигатель и, замкнув рубильник QS3, постепенно повышают ток  $I_b$  в обмотке возбуждения генератора, наблюдая за показаниями вольтметра PV и частотомера  $Pf$ . Затем, увеличивая сопротивление реостата  $r_{рт}$  в цепи возбуждения приводного двигателя, устанавливают синхронную частоту вращения. После этого, регулируя силу тока возбуждения генератора потенциометром RP, устанавливают на выходе генератора номинальное напряжение  $U_{ном}$ .

**Характеристика холостого хода** — это зависимость ЭДС генератора в режиме холостого хода  $E_0$  от тока в обмотке возбуждения генератора  $I_b$  при номинальной (синхронной) частоте вращения. Характеристику холостого хода принято строить в относительных величинах ЭДС  $E_{0^*}$  и тока возбуждения  $I_{b^*}$ :  $E_{0^*} = f(I_{b^*})$ , где  $E_{0^*} = E_0 / U_{ном}$  и  $I_{b^*} = I_b / I_{bном}$ . За базовые величины при определении относительных значений ЭДС и тока возбуждения принимают соответственно номинальное значение напряжения на выходе генератора  $U_{ном}$  и ток возбуждения  $I_{bном}$  соответствующий ЭДС холостого хода, равной номинальному напряжению генератора.

После пуска приводного двигателя и установки номинальной частоты вращения доводят силу тока возбуждения генератора  $I_b$  до значения, при котором ЭДС холостого хода  $E_0 = 1,3 U_{ном}$ , а затем постепенно уменьшают ток возбуждения до нуля. При этом через приблизительно одинаковые интервалы ЭДС  $E_0$  снимают показания приборов (амперметра PA2 и вольтметра PV) и заносят их в табл. 11.1.

Показания приборов, снятые при увеличении тока возбуждения (при намагничивании), соответствуют восходящей ветви характеристики холостого хода, а показания, снятые при уменьшении тока возбуждения (при размагничивании), — нисходящей ветви этой характеристики.

За характеристику холостого хода принимают среднюю линию, проведенную между восходящей и нисходящей ветвями. При снятии данных восходящей ветви характеристики холостого хода не-

обходимо, чтобы изменение тока возбуждения  $I_v$  происходило только в направлении нарастания, а при снятии данных нисходящей ветви — только в направлении убывания. Для сравнения характеристики холостого хода, полученной опытным путем, с нормальной характеристикой холостого хода синхронной машины следует обе характеристики строить в одних осях координат.

Ниже приведены данные нормальной характеристики холостого хода синхронной машины:

$I_v \cdot$ .....	0,6	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$E_0 \cdot$ .....	0,58	1,0	1,21	1,33	1,40	1,46	1,51

**Внешняя характеристика** — это зависимость напряжения на выходе генератора  $U_1$  от тока нагрузки  $I_1$  при неизменных частоте вращения ( $n_2 = n_1$ ), токе возбуждения  $I_v = \text{const}$  и коэффициенте мощности  $\cos \varphi_1 = \text{const}$ .

Опыт проводят следующим образом. Включают приводной двигатель, устанавливают синхронную частоту вращения  $n_2 = n_1$  и поддерживают ее неизменной в течение всего опыта. Затем подключают активную нагрузку (включением рубильника QS1) и регулируют сопротивление нагрузки  $R_n$  и силу тока возбуждения таким образом, чтобы при номинальном напряжении ( $U_1 = U_{\text{ном}}$ ) ток нагрузки генератора был номинальным ( $I_1 = I_{\text{ном}}$ ). Потом постепенно разгружают генератор до холостого хода ( $U_1 = 0$ ) и получают данные внешней характеристики при активной нагрузке ( $\cos \varphi_1 = 1$ ). После этого опыт повторяют при активно-индуктивной нагрузке (QS1 разомкнут, QS2 замкнут). Показания амперметра РА и вольтметра РВ заносят в табл. 11.2 и строят две внешние характеристики генератора в одних осях координат.

При  $\cos \varphi_1 = 1$  и  $\cos \varphi_1 < 1$  номинальное изменение напряжения генератора при сбросе нагрузки (%)

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{U_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100, \quad (11.1)$$

где  $U_0 = E_0$  — напряжение генератора в режиме холостого хода, В.

**Регулировочная характеристика** представляет собой зависимость тока возбуждения генератора  $I_v$  от тока нагрузки  $I_1$  при неизменной частоте вращения  $n_2 = n_1$  и напряжении  $U_1 = U_{\text{ном}}$ .

Таблица 11.2

Номер измерения	$\cos \varphi_1 = 1$		Номер измерения	$\cos \varphi_1 < 1$	
	$I_1, A$	$U_1, B$		$I_1, A$	$U_1, B$

Таблица 11.3

Номер измерения	$\cos \varphi_1 = 1$		Номер измерения	$\cos \varphi_1 < 1$	
	$I_1, A$	$I_v, A$		$I_1, A$	$I_v, A$

Таблица 11.4

Параметр	Номер измерения					
	1	2	3	4	5	6
$I_{1к}$ , А						
$I_{в}$ , А						
$I_{1к*}$						
$I_{в*}$						

Генератор постепенно нагружают на активную нагрузку (QS2 замкнут) и регулируют ток возбуждения  $I_{в}$  таким образом, чтобы напряжение на выходе генератора в течение всего опыта оставалось неизменным и равным номинальному. При этом через приблизительно одинаковые интервалы тока нагрузки (амперметр PA1) измеряют ток возбуждения генератора (амперметр PA2). Показания приборов заносят в табл. 11.3. Опыт повторяют при активно-индуктивной нагрузке (QS1 отключен, QS2 включен).

По регулировочным характеристикам определяют номинальное изменение тока возбуждения (%)

$$\Delta I_{в.ном} = \frac{I_{в.ном} - I_{в.0ном}}{I_{в.0ном}} 100, \quad (11.2)$$

где  $I_{в.ном}$  и  $I_{в.0ном}$  — значения токов возбуждения, соответствующие номинальному напряжению генератора  $U_{ном}$  при номинальной нагрузке и в режиме холостого хода соответственно, А.

**Характеристика короткого замыкания** — это зависимость тока статора при опыте короткого замыкания  $I_{1к}$  от тока возбуждения  $I_{в}$  при неизменной частоте вращения  $n_1$ . Характеристику короткого замыкания принято строить в относительных единицах:  $I_{1к*} = f(I_{в*})$ , где  $I_{1к*} = I_{1к}/I_{1ном}$ , а  $I_{в*} = I_{в}/I_{в0ном}$ .

Собирают схему опыта трехфазного короткого замыкания синхронного генератора (см. рис. 11.2) и после проверки ее преподавателем автоматом QF (см. рис. 11.1) включают приводной двигатель при отключенном возбуждении генератора (QS3 разомкнут). Установив номинальную частоту вращения  $n_1$  и поддерживая ее в течение всего опыта неизменной, включают рубильник QS3 и потенциометром RP постепенно увеличивают ток возбуждения генератора до значения, при котором ток короткого замыкания  $I_{1к} = 1,2I_{1ном}$ . При этом через приблизительно одинаковые интервалы тока  $I_{1к}$  (амперметр PA1) измеряют ток возбуждения  $I_{в}$  (амперметр PA2). Одно измерение должно соответствовать току  $I_{1к} = I_{1ном}$ . Показания приборов заносят в табл. 11.4.

Затем показания приборов пересчитывают в относительные значения и строят характеристику короткого замыкания. Отношение короткого замыкания

$$\text{ОКЗ} = I_{\text{в.к.ном}} / I_{\text{в.к.ном}}, \quad (11.3)$$

где  $I_{\text{в.к.ном}}$  — ток возбуждения генератора при опыте короткого замыкания, соответствующий номинальному току статора ( $I_{\text{лк}} = I_{\text{ном}}$ ), А.

Для явнополюсных синхронных машин  $\text{ОКЗ} = 0,9 - 1,9$ .

### Анализ результатов лабораторной работы

Анализируя результаты лабораторной работы, дают заключение о соответствии характеристик генератора, полученных опытным путем, типовым характеристикам, приведенным в [5]. При этом объясняют физические процессы, обусловившие форму того или иного графика. Например, объясняют, почему характеристика холостого хода имеет криволинейный вид, а ее ветви при намагничивании и размагничивании не совпадают. При сравнении опытной характеристики холостого хода с нормальной следует дать количественную оценку расхождению этих характеристик, рассчитав наибольшую величину этого расхождения (%):

$$E_{\text{о.наиб}} = (E_{\text{о.оп}} - E_{\text{о.норм}}), \quad (11.4)$$

где  $E_{\text{о.оп}}$  и  $E_{\text{о.норм}}$  — относительные значения напряжений холостого хода, взятые по опытной и нормальной характеристикам холостого хода соответственно при токе возбуждения  $I_{\text{в}}$ , соответствующем наибольшему расхождению этих характеристик.

При анализе внешних и регулировочных характеристик генератора следует объяснить причины, вызвавшие их расхождение при активной и активно-реактивной видах нагрузки. Рассматривая свойства генератора, целесообразно воспользоваться понятиями номинального изменения напряжения при сбросе нагрузки (11.1) и номинального изменения тока возбуждения (11.2).

Анализируя результат опыта короткого замыкания, необходимо объяснить причины прямолинейности характеристики короткого замыкания.

### Контрольные вопросы

1. Какова конструкция синхронных машин с явнополюсным и неявнополюсным роторами?
2. Какие способы возбуждения применяют в синхронных генераторах?
3. Можно ли регулировать напряжение синхронного генератора изменением частоты вращения ротора?
4. Почему характеристики холостого хода синхронного генератора при намагничивании и размагничивании не совпадают?
5. Почему внешние и регулировочные характеристики синхронного генератора, снятые при разных видах нагрузки, не совпадают?
6. Чем объясняется прямолинейный вид характеристики короткого замыкания синхронного генератора?
7. Что такое отношение короткого замыкания синхронного генератора и как влияет его величина на свойства генератора?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

### Исследование трехфазного синхронного генератора, включенного на параллельную работу с сетью

**Цель работы.** Приобрести практические навыки в сборке схемы и включении синхронного генератора на параллельную работу с сетью методом точной синхронизации; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах синхронного генератора, включенного на параллельную работу.

#### Программа работы

1. Ознакомиться с конструкцией синхронного генератора и приводного двигателя; записать их паспортные данные и данные измерительных приборов.
2. Собрать схему по рис. 12.1 и после проверки ее преподавателем произвести пуск генератора, проверить возможность регулировки параметров генератора.
3. Включить синхронный генератор на параллельную работу с сетью методом точной синхронизации.
4. Снять показания приборов и построить U-образные характеристики синхронного генератора.
5. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

#### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал [5]: условия включения синхронных генераторов на параллельную работу; метод точной синхронизации; параллельная работа синхронного генератора с сетью при изменении вращающего момента приводного двигателя и при изменении тока возбуждения генератора; электромагнитная мощность и электромагнитный момент синхронного генератора; угловая характеристика и перегрузочная способность синхронного генератора.
2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

#### Порядок выполнения работы

**Схема включения.** В качестве приводного двигателя синхронного генератора (рис. 12.1) используют двигатель постоянного тока параллельного возбуждения, порядок включения которого изложен в лабораторной работе № 11. Для измерения активной мощности генератора в схеме применен трехфазный двухэлементный ваттметр РW, токовые обмотки которого включены в линейные провода через трансформаторы тока.

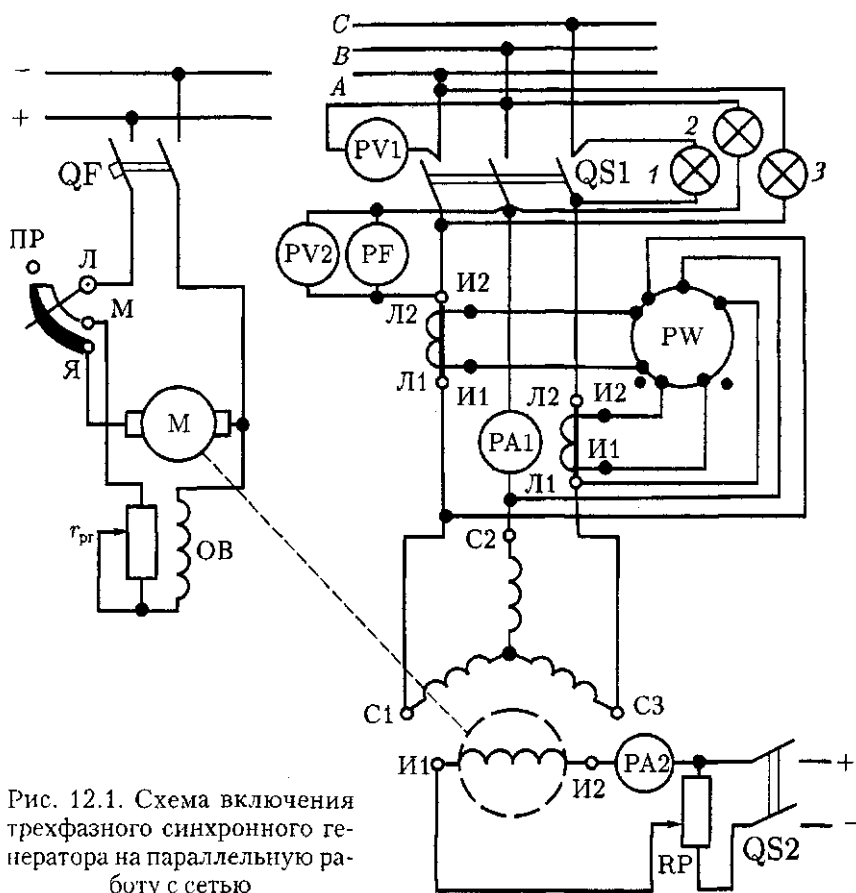


Рис. 12.1. Схема включения трехфазного синхронного генератора на параллельную работу с сетью

Для точной синхронизации генератора использован ламповый синхроскоп (возможно включение стрелочного синхроскопа). Лампы этого синхроскопа соединены по схеме «на погасание». Возможно включение ламп синхроскопа и по схеме «на вращение света».

**Включение генератора на параллельную работу.** При включении трехфазного синхронного генератора на параллельную работу с сетью необходимо соблюдение следующих условий:

ЭДС генератора должна быть равна напряжению сети;

частота ЭДС генератора и частота напряжения сети должны быть равны;

ЭДС генератора должна находиться в противофазе с напряжением сети;

чередование фаз генератора должно соответствовать чередованию фаз сети.



Приведение генератора в состояние, удовлетворяющее перечисленным условиям, называют *синхронизацией*. Соблюдение условий синхронизации проверяют с помощью синхроскопа. Простейший синхроскоп — ламповый, состоящий из трех ламп накаливания, которые могут быть включены по двум схемам: «на погасание» или «на вращение света».

При использовании синхроскопа по схеме «на погасание» каждая лампа включается в разрыв какой-либо фазы (рис. 12.1). В этом случае момент синхронизации соответствует одновременному погасанию всех трех ламп.

При несоблюдении условий синхронизации лампы вспыхивают и гаснут (мигают). Однако по мере приближения генератора к условиям синхронизации мигание ламп становится все реже. Когда мигание ламп становится настолько редким, что пауза между ними продолжается не менее 5–7 с, следует в момент погасания ламп замкнуть рубильник QS1, подключающий генератор к сети на параллельную работу.

При включении ламп по схеме «на вращение света» (рис. 12.2) соблюдению условий синхронизации соответствует погасание лампы 2 и горение с одинаковой яркостью ламп 1 и 3. При несоблюдении условий синхронизации лампы вспыхивают поочередно, создавая эффект вращения света. По мере приближения к соблюдению условий синхронизации частота «вращения света» замедляется.

Возможен случай, когда лампы, включенные по схеме «на погасание», создают эффект вращения света, и наоборот, включенные по схеме «на вращение света» одновременно гаснут и загораются. Такое явление обусловлено несоответствием чередования фаз на генераторе чередованию фаз сети. В этом случае следует поменять местами провода, соединяющие генератор с зажимами рубильника QS1 (см. рис. 12.1).

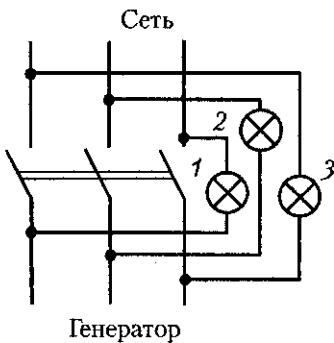


Рис. 12.2. Схема включения ламп синхроскопа «на вращение света»

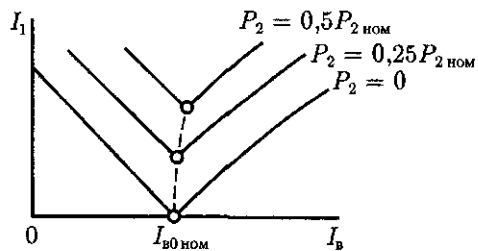


Рис. 12.3. U-образные характеристики синхронного генератора

После пуска приводного двигателя генератор возбуждают включением рубильника QS2 и затем по показанию частотомера PF устанавливают синхронную частоту вращения  $n_1$ . С помощью потенциометра RP устанавливают ЭДС генератора  $E_{10} = U_{ном}$ , равную напряжению сети  $U_c$ . После этого, медленно перемещая движок регулировочного реостата  $r_{рг}$  в цепи обмотки возбуждения приводного двигателя, наблюдают за поведением ламп синхроскопа, добиваясь их состояния, соответствующего соблюдению условий синхронизации. Добившись этого, включают рубильник QS1.

**U-образные характеристики генератора.** Эти характеристики представляют собой зависимость тока статора  $I_1$ , от тока возбуждения  $I_b$  генератора, при неизменной полезной мощности генератора  $P_2$ . U-образные характеристики снимают для трех значений полезной мощности генератора:  $P_2 = 0$  (режим холостого хода),  $P_2 = 0,25P_{2ном}$ ,  $P_2 = 0,5P_{2ном}$ .

Включив генератор на параллельную работу с сетью, увеличивают ток возбуждения генератора  $I_b$  до тех пор, пока ток в цепи статора генератора не достигнет номинального значения  $I_{1ном}$ . При этом приблизительно через одинаковые интервалы тока возбуждения  $I_b$  измеряют ток статора  $I_1$ , и показания приборов PA1 и PA2 заносят в табл. 12.1. Затем постепенно уменьшают ток возбуждения  $I_b$  до тех пор, пока ток статора  $I_1$ , пройдя через минимум, не возрастет опять до номинального значения. После этого восстанавливают прежнее значение тока возбуждения  $I_{b,ном}$ , при котором ток статора имеет минимальное значение и, воздействуя на регулировочный реостат в цепи обмотки возбуждения приводного двигателя, доводят активную нагрузку генератора до значения  $P_2 = 0,25P_{2ном}$ . Данные U-образной характеристики для этой нагрузки генератора снимают в изложенном выше порядке и заносят их в табл. 12.1. Опыт повторяют для нагрузки генератора  $P_2 = 0,5P_{2ном}$ .

На построенном графике следует указать зоны работы генератора с опережающим и отстающим токами статора. Точки на графиках, соответствующие минимальному току статора, соединяют пунктирной линией (рис. 12.3). Коэффициент мощности генератора при различных значениях тока статора  $I_1$

$$\cos \varphi_1 = P_2 / (\sqrt{3}U_1 I_1).$$

Таблица 12.1

Номер измерения	$P_2 = 0$			Номер измерения	$P_2 = 0,25P_{2ном}$			Номер измерения	$P_2 = 0,5P_{2ном}$		
	$I_b, A$	$I_1, A$	$\cos \varphi_1$		$I_b, A$	$I_1, A$	$\cos \varphi_1$		$I_b, A$	$I_1, A$	$\cos \varphi_1$

## Анализ результатов лабораторной работы

Анализируя результаты лабораторной работы, сосредотачивают внимание на U-образных характеристиках генератора. При этом следует объяснить влияние силы тока возбуждения генератора на фазовый сдвиг тока статора  $I_1$  относительно напряжения сети  $U_c$ , уточнив при этом характер реактивной составляющей тока статора при недовозбуждении и перевозбуждении генератора.

Далее необходимо объяснить, почему с ростом активной нагрузки генератора увеличивается значение тока возбуждения, соответствующего работе генератора с  $\cos \varphi_1 = 1$ . И наконец, следует указать, с каким значением тока возбуждения работа генератора наиболее экономична. При этом имеют в виду возможный вид нагрузки генератора – активно-индуктивный или активно-емкостный.

### Контрольные вопросы

1. Какие условия необходимо соблюсти, прежде чем включить синхронный генератор на параллельную работу?
2. Каким прибором контролируется соблюдение условий синхронизации?
3. Как нагрузить синхронный генератор, подключенный на параллельную работу с сетью?
4. Изложите порядок действий при снятии данных для построения U-образных характеристик синхронного генератора.
5. Как определить, при какой величине тока возбуждения синхронный генератор, включенный на параллельную работу с сетью, будет работать с коэффициентом мощности  $\cos \varphi_1 = 1$ ?
6. Если изменится активная нагрузка этого генератора, то потребуются ли изменить ток возбуждения, чтобы  $\cos \varphi_1$  остался равным единице.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

### Исследование трехфазного синхронного двигателя

**Цель работы.** Изучить устройство синхронного двигателя и приобрести практические навыки в сборке схемы, пуске и снятии данных для построения характеристик двигателя; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах трехфазных синхронных двигателей.

### Программа работы

1. Ознакомиться с конструкцией синхронного двигателя и устройством для его нагрузки; записать паспортные данные двигателя и измерительных приборов.

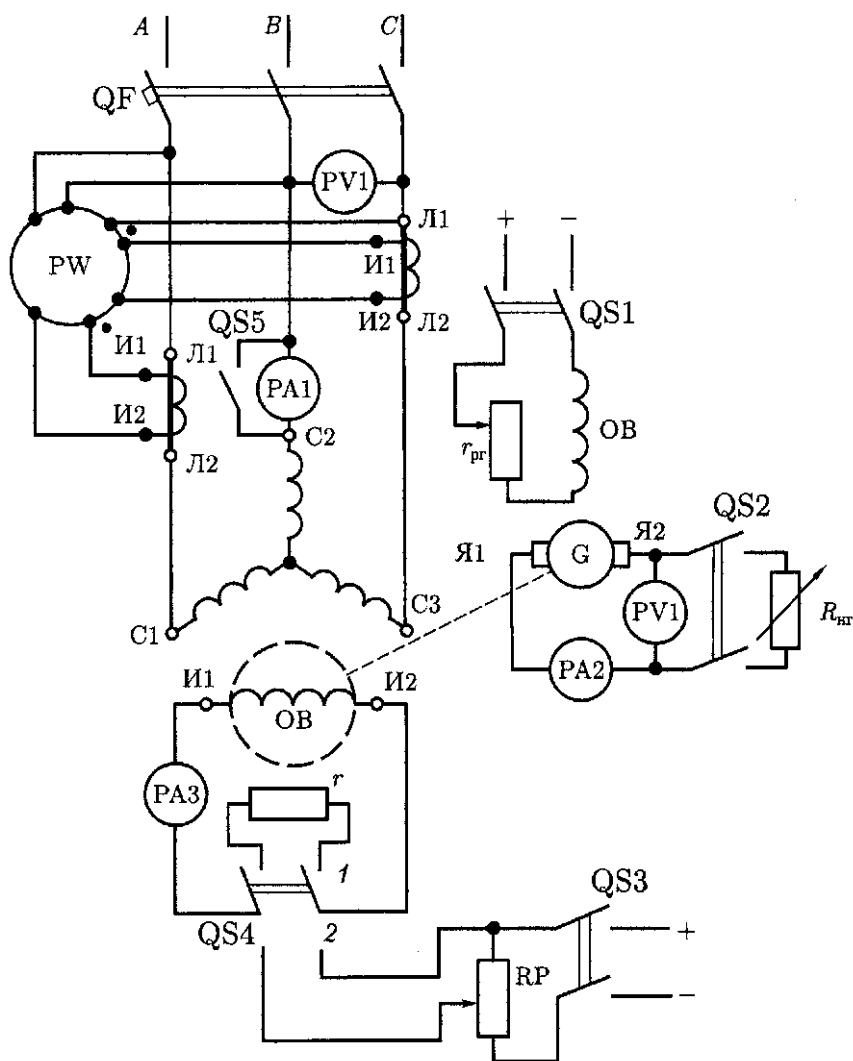


Рис. 13.1. Схема включения трехфазного синхронного двигателя

2. Собрать схему по рис. 13.1 и после проверки ее преподавателем произвести пуск двигателя.

3. Снять данные и построить U-образную характеристику при нормальной нагрузке двигателя.

4. Снять данные и построить рабочие характеристики двигателя при  $\cos \varphi_1 \approx 1$ .

5. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

## Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал [5]: принцип работы синхронного двигателя; конструктивные особенности синхронного двигателя и способы его пуска; электромагнитная мощность и электромагнитный момент синхронного двигателя, угловая характеристика; работа синхронного двигателя при изменениях тока возбуждения и нагрузочного момента на валу; перегрузочная способность и рабочие характеристики синхронного двигателя.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

## Порядок выполнения работы

**Схема соединений и пуск двигателя.** Для измерения активной мощности, потребляемой двигателем из сети, в схеме (рис. 13.1) предусмотрен трехфазный двухэлементный ваттметр PW, токовые катушки которого включены через трансформаторы тока. В цепь обмотки возбуждения двигателя включен переключатель QS4, позволяющий на время пуска двигателя замкнуть обмотку возбуждения ОВ на активное гасящее сопротивление  $r$  (положение 1), а по окончании пуска подключить эту обмотку к источнику постоянно-го тока (положение 2), т. е. возбудить двигатель.

В качестве нагрузочного устройства синхронного двигателя в схеме предусмотрен генератор постоянного тока G независимого возбуждения. Величина нагрузочного момента на валу двигателя  $M_2$  регулируется электрическим сопротивлением нагрузочного реостата  $R_{нr}$ , включенного на выводы обмотки якоря генератора, и изменением тока возбуждения генератора (регулирующим реостатом  $r_{pr}$ ). Для увеличения нагрузочного момента уменьшают либо нагрузочное сопротивление генератора  $R_{нr}$ , либо сопротивление реостата  $r_{pr}$  в цепи возбуждения генератора.

Нагрузочный момент на валу двигателя (Н·м)

$$M_2 = 9,55P_r / (n_1 \eta_r), \quad (13.1)$$

где  $n_1$  — синхронная частота вращения, об/мин;  $\eta_r$  — КПД генератора (в долях единицы), задается в виде графика зависимости  $\eta_r = f(P_r)$ .

Мощность на выходе нагрузочного генератора (Вт)

$$P_r = U_r I_r, \quad (13.2)$$

где  $U_r$  и  $I_r$  — напряжение (В) и ток (А) в цепи якоря генератора, измеряемые вольтметром PV2 и амперметром PA2.

Двигатель включается в сеть автоматом QF. При этом в цепи стартера двигателя возникает значительный пусковой ток. При необходимости для ограничения этого тока применяют методы, рассмотренные при изложении вопросов пуска асинхронных двигателей (см.

лабораторную работу № 7) — либо переключение обмотки статора со звезды на треугольник, либо включение обмотки статора в сеть через реакторы или понижающий автотрансформатор.

Для предохранения амперметра РА1 от разрушения большим пусковым током в схеме предусмотрен шунтирующий ключ QS5. Амперметр РА3 в цепи обмотки возбуждения ОВ синхронного двигателя должен иметь двустороннюю шкалу (ноль посередине).

После сборки схемы и проверки ее преподавателем осуществляют асинхронный пуск синхронного двигателя. Для этого ключ QS5 замыкают, а переключатель QS4 ставят в положение 1, т. е. замыкают обмотку возбуждения двигателя на активное сопротивление  $r$ . Затем включают автомат QF, подключающий к сети обмотку статора синхронного двигателя. Ротор двигателя начинает вращаться и, разгоняясь, приближается к синхронной частоте вращения  $n_1$ . При этом стрелка амперметра РА3 отклоняется влево и вправо от нуля. Когда нарастание частоты вращения ротора прекратится, то в момент отклонения стрелки амперметра РА3 в какую-либо сторону следует возбудить двигатель, т. е. быстро перевести переключатель QS4 в положение 2, подав напряжение в цепь ОВ. После этого двигатель втягивается в синхронизм и процесс пуска заканчивается. Далее следует разомкнуть ключ QS4 и потенциометром РР установить такую силу тока возбуждения  $I_b = I_{b,ном}$ , при которой ток статора имеет минимальное значение.

**U-образные характеристики** синхронного двигателя представляют собой зависимость тока статора  $I_1$  и коэффициента мощности  $\cos \varphi_1$  от тока возбуждения двигателя  $I_b$  при неизменной полезной мощности двигателя  $P_2$  (рис. 13.2, график 1).

Данные для построения U-образных характеристик получают следующим образом. После пуска синхронного двигателя подключают к генератору нагрузочный реостат  $R_{нр}$  (замыкают рубильник QS2) и реостатом  $r_{нр}$  увеличивают ток возбуждения генератора до значения, при котором ток статора двигателя  $I_1$  не достигнет величины  $I_1 = 0,5 I_{1,ном}$ . Одновременно корректируют величину тока возбуждения двигателя, отыскав такое его значение ( $I_b = I_{b,ном}$ ), при котором ток статора имеет минимальное при заданной нагрузке значение, представляющее собой активный ток статора  $I_1 = I_{1a}$ . Затем потенциометром РР увеличивают ток возбуждения синхронного двигателя до значения, при котором ток статора достигнет номинальной величины  $I_{1,ном}$ . При этом через примерно одинаковые интервалы этого тока снимают показания амперметров РА1 и РА3 и ваттметра РВ и заносят их в табл. 13.1. Снимают не менее пяти по-

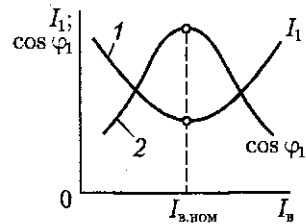


Рис. 13.2. U-образная характеристика синхронного двигателя

Таблица 13.1

Помер измерения и вычисления	Измерения			Вычисления	
	$I_B$ , А	$I_1$ , А	$P'_1$ , дел.	$P_1$ , Вт	$\cos \varphi_1$

казаний. Затем восстанавливают прежнее значение тока возбуждения генератора  $I_{B, \text{ном}}$ , соответствующее минимальному значению тока статора  $I_1$ . После этого постепенно уменьшают ток возбуждения синхронного генератора до величины, при которой ток статора вновь достигнет номинального значения. Показания приборов заносят в табл. 13.1.

По данным табл. 13.1 строят U-образную характеристику  $I_1 = f(I_B)$  и характеристику коэффициента мощности  $\cos \varphi_1 \approx f(I_B)$  (см. рис. 13.2, график 2). Наибольшее значение  $\cos \varphi_1$  соответствует минимальному току  $I_1$ .

Известно, что частота вращения ротора синхронного двигателя при изменениях нагрузки остается неизменно равной синхронной частоте вращения. Однако при перегрузке двигателя или при резком уменьшении напряжения в сети возможно «выпадение» двигателя из синхронизма. Поэтому при выполнении экспериментов необходимо контролировать синхронную частоту вращения двигателя. Это удобнее всего делать стробоскопическим способом: либо с помощью строботачометра (см. рис. В.12), либо с помощью стробоскопических меток, нанесенных в виде чередующихся черных и белых полос на поверхность муфты, соединяющей валы двигателя и нагрузочного устройства. Число этих полос должно быть равно числу полюсов  $2p$  двигателя. Так, при частоте тока 50 Гц, если  $2p = 2$  ( $n_1 = 3000$  об/мин), то должна быть одна белая и одна черная полосы, а если  $2p = 4$  ( $n_1 = 1500$  об/мин), то должны быть две белые и две черные чередующиеся полосы и т. д.

Вращающаяся поверхность с нанесенными полосами должна освещаться лампой, включенной в сеть переменного тока (50 Гц). Если в процессе работы двигателя полосы кажутся неподвижными, то это свидетельствует о синхронной частоте вращения ротора, если же эти полосы кажутся вращающимися в сторону, противоположную фактическому вращению муфты, то это свидетельствует о «выпадении» двигателя из синхронизма.

Мощность, потребляемая двигателем из сети (Вт):

$$P_1 = P'_1 k_T C_W, \quad (13.3)$$

где  $k_T$  — коэффициент трансформации трансформатора тока;  $C_W$  — цена деления ваттметра, Вт/дел.

Таблица 13.2

Порядок измерения и вычисления	Измерения						Вычисления					
	$I_b$ , А	$I_1$ , А	$P'_1$ , дел.	$U_1$ , В	$U_r$ , В	$I_r$ , А	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$M_2$ , Н·м	$P_r$ , Вт	$\cos \varphi_1$	$\eta$ , %

Коэффициент мощности двигателя

$$\cos \varphi_1 = P_1 / (\sqrt{3} U_1 I_1), \quad (13.4)$$

где  $U_1$  — напряжение сети, В.

**Рабочие характеристики** синхронного двигателя представляют собой зависимость тока статора  $I_1$ , потребляемой мощности  $P_1$ , нагрузочного момента  $M_2$  и КПД  $\eta$  от полезной мощности двигателя при токе возбуждения  $I_b = I_{b,ном}$ , соответствующем  $\cos \varphi_1 = 1$ .

После пуска двигателя устанавливают ток возбуждения  $I_{b,ном}$ , соответствующий  $\cos \varphi_1 = 1$ . Затем замыкают QS1 и QS2 (см. рис. 13.1) и нагружают генератор G, постепенно доводя ток статора синхронного двигателя до значения  $I_{1,ном}$ . Приблизительно через одинаковые интервалы этого тока снимают показания приборов и заносят их в табл. 13.2.

Так как рабочие характеристики синхронного двигателя соответствуют  $\cos \varphi_1 \approx 1$ , то при каждом снятии показаний приборов следует установить величину тока возбуждения двигателя  $I_{b,ном}$ , соответствующую минимальному значению тока статора  $I_1$  при данном нагрузочном моменте  $M_2$ , а следовательно, коэффициенту мощности  $\cos \varphi_1 = 1$ .

Затем выполняют расчеты: подводимая к двигателю мощность по (13.3); мощность на выходе генератора по (13.2); момент на валу двигателя по (13.1); коэффициент мощности двигателя по (13.4); полезная мощность двигателя (Вт)

$$P_2 = P_r / \eta_g; \quad (13.5)$$

КПД двигателя (%)

$$\eta = (P_2 / P_1) 100. \quad (13.6)$$

По данным табл. 13.2 строят рабочие характеристики синхронного двигателя в одних осях координат.

### Анализ результатов лабораторной работы

Анализируя результаты лабораторной работы, в первую очередь устанавливают соответствие номинальных параметров двигателя, полученных опытным путем, его паспортным данным. Затем, ис-



пользуя U-образные характеристики двигателя, определяют его зоны работы с отстающим и опережающим по фазе током статора. Необходимо определить, при каком значении тока возбуждения работа двигателя наиболее экономична. При этом следует также иметь в виду влияние индуктивного характера нагрузки, создаваемой потребителями электроэнергии, включенными в общую сеть с синхронным двигателем.

Анализируя рабочие характеристики двигателя, необходимо дать заключение о соответствии формы полученных графиков типовым, приведенным в учебнике [5].

### **Контрольные вопросы**

1. Объясните принцип работы синхронного двигателя.
2. Какие существуют способы пуска синхронных двигателей?
3. С какой целью при асинхронном пуске синхронного двигателя обмотку возбуждения замыкают на активное сопротивление?
4. Почему при регулировке тока возбуждения меняется значение тока статора синхронного двигателя?
5. При каких условиях синхронный двигатель работает с отстающим током статора, а при каких с опережающим?
6. Что такое выпадение синхронного двигателя из синхронизма и при каких условиях оно происходит?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14**

### **Исследование синхронного реактивного конденсаторного двигателя**

**Цель работы.** Изучить устройство синхронного реактивного конденсаторного двигателя и приобрести практические навыки в сборке схем соединения и опытном исследовании двигателя для определения его основных параметров; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах реактивных синхронных двигателей.

### **Программа работы**

1. Ознакомиться с конструкцией двигателя и нагрузочного устройства, записать паспортные данные двигателя, данные измерительных приборов и регулятора напряжения
2. Собрать схему по рис. 14.1 и после проверки ее преподавателем снять данные и построить рабочие характеристики двигателя.
3. Определить моменты входа двигателя в синхронизм и выхода из синхронизма при напряжениях  $U_{1ном}$ ;  $1,15 U_{1ном}$  и  $0,85 U_{1ном}$ .
4. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

## Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал [7]: устройство и принцип действия синхронного реактивного двигателя; реактивный момент и угловая характеристика двигателя; момент входа в синхронизм и момент выхода из синхронизма; конденсаторные двигатели.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатную сетку для построения рабочих характеристик.

## Порядок проведения работы

**Схема соединений.** Синхронный реактивный двигатель (рис. 14.1) в отличие от обычного синхронного двигателя не имеет на роторе обмотки возбуждения. Его ротор представляет собой явнополюсную шихтованную конструкцию из тонколистовой электротехнической стали с короткозамкнутой пусковой клеткой.

Исследуемый двигатель является конденсаторным, т. е. на его статоре имеются две однофазные обмотки  $A$  и  $B$ , оси которых сдвинуты

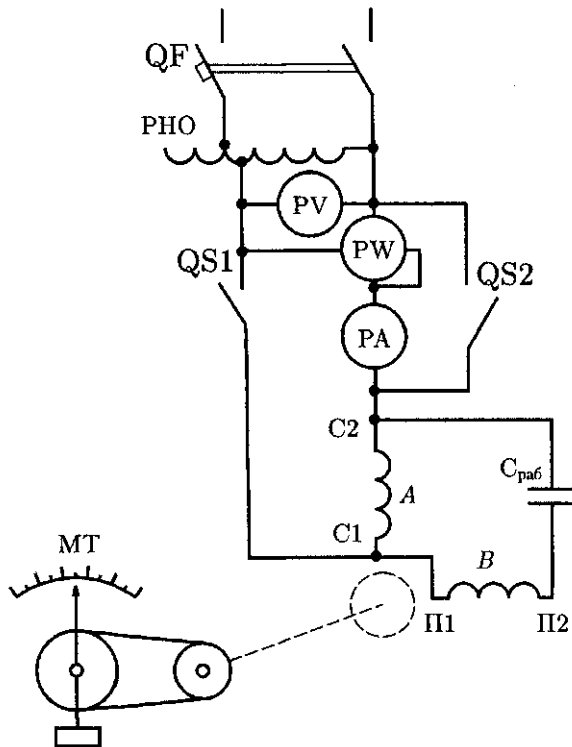


Рис. 14.1. Схема включения синхронного реактивного конденсаторного двигателя

в пространстве относительно друг друга на 90 эл. град. В цепь обмотки  $B$  включен фазосдвигающий элемент — конденсатор  $C_{\text{раб}}$ . Емкость этого конденсатора выбрана таким образом, чтобы обеспечить в двигателе круговое вращающееся поле при номинальной нагрузке.

Для измерения активной мощности, потребляемой двигателем из сети, в схеме применен однофазный ваттметр. Для предохранения амперметра РА и последовательной катушки ваттметра РW от повреждения большим пусковым током в схему включен ключ QS2, шунтирующий эти приборы. Подводимое к двигателю напряжение регулируют с помощью автотрансформатора РНО.

Предполагается, что исследуемый двигатель имеет небольшую мощность (не более 50 Вт) и для его нагрузки используют ленточный тормоз маятникового типа МТ (см. В.5).

Для контроля за синхронной частотой вращения ротора двигателя на его шкиве, установленном на валу двигателя, нанесены стробоскопические метки (см. лабораторную работу № 13).

Пуск двигателя выполняют следующим образом. Собирают схему по рис. 14.1 и после проверки ее преподавателем, замкнув ключ QS2 при разомкнутом ключе QS1, включают автомат QF и регулятором напряжения РНО устанавливают номинальное напряжение на входе двигателя. Затем, замкнув ключ QS1, запускают двигатель. Окончание процесса пуска и вхождение двигателя в синхронизм фиксируются по стробоскопическим меткам на шкиве двигателя, которые при синхронной частоте вращения кажутся неподвижными. После этого ключ QS2 размыкают.

**Рабочие характеристики.** Посредством нагрузочного тормоза МТ постепенно увеличивают момент нагрузки на валу двигателя  $M_2$  до значения, при котором потребляемый двигателем ток  $I_1 = 1,2I_{1\text{ном}}$ . При этом через приблизительно одинаковые интервалы этого тока снимают показания приборов. Делают не менее пяти измерений и показания приборов заносят в табл. 14.1. Затем выполняют расчеты:

полезная мощность двигателя (Вт)

$$P_2 = 0,105M_2n_1; \quad (14.1)$$

коэффициент мощности

$$\cos \varphi_1 = P_1/(U_1I_1); \quad (14.2)$$

КПД двигателя (%)

$$\eta = (P_2/P_1)100. \quad (14.3)$$

Таблица 14.1

Номер измерения и вычисления	Измерения				Вычисления		
	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$P_1$ , Вт	$M_2$ , Н·м	$P_2$ , Вт	$\cos \varphi_1$	$\eta$ , %

По данным табл. 14.1 строят в одних осях координат рабочие характеристики двигателя: зависимости тока  $I_1$ , потребляемой мощности  $P_1$ , нагрузочного момента (момента на валу)  $M_2$ , коэффициента мощности  $\cos \varphi_1$  и КПД двигателя от полезной мощности  $P_2$ .

**Моменты входа двигателя в синхронизм и выхода из синхронизма.** Момент входа в синхронизм представляет собой наибольший момент сопротивления на валу двигателя, при котором ротор еще втягивается в синхронизм. Момент входа в синхронизм  $M_{вх}$  — это асинхронный момент и при заданном напряжении питания его значение определяется параметрами короткозамкнутой пусковой клетки на роторе.

Момент выхода из синхронизма  $M_{вых}$  — это максимальный синхронный реактивный момент. Дело в том, что если момент нагрузки на валу двигателя достигнет значения, равного максимальному реактивному моменту, то работа двигателя становится неустойчивой, так как даже при незначительном увеличении нагрузки происходит разрыв магнитной связи между полюсами вращающегося магнитного поля статора и явнополюсным ротором. В этом случае ротор двигателя либо остановится, либо будет продолжать вращение под действием асинхронного момента с частотой вращения  $n_2 < n_1$ .

Для экспериментального определения моментов  $M_{вх}$  и  $M_{вых}$  поступают следующим образом. Регулятором напряжения РНО устанавливают номинальное напряжение  $U_{1ном}$ . Затем автоматом QF включают двигатель и с помощью тормозного устройства постепенно увеличивают нагрузку на валу двигателя до значения, при котором произойдет выход двигателя из синхронизма, т.е. нарушится синхронное вращение ротора (стробоскопические метки на шкиве перестанут казаться неподвижными). Величина нагрузочного момента на валу двигателя, при котором это произойдет, и представляет собой момент выхода двигателя из синхронизма  $M_{вых}$ .

После этого плавно уменьшают момент нагрузки до тех пор, пока двигатель не втянется в синхронизм (стробоскопические метки вновь будут казаться неподвижными). Соответствующий этому нагрузочный момент на валу двигателя представляет собой момент входа в синхронизм  $M_{вх}$ . Опыт повторяют при пониженном ( $0,85 U_{1ном}$ ) и при повышенном ( $1,15 U_{1ном}$ ) напряжениях. Результаты измерений заносят в табл. 14.2 и определяют кратности моментов по отношению к номинальному моменту двигателя  $M_{ном}$  (см. табл. 14.1):  $M_{вх}/M_{2ном}$  и  $M_{вых}/M_{2ном}$ .

Таблица 14.2

$U_1, В$	$M_{вых}, Н \cdot м$	$M_{вх}, Н \cdot м$	$M_{вых}/M_{2ном}$	$M_{вх}/M_{2ном}$
$U_{1ном}$				
$0,85 U_{1ном}$				
$1,15 U_{1ном}$				

## Анализ результатов лабораторной работы

Анализ результатов лабораторной работы начинают с определения соответствия паспортных данных двигателя номинальным параметрам, полученным опытным путем.

Анализируя форму графиков рабочих характеристик, необходимо иметь в виду, что исследуемый двигатель относится к категории микродвигателей и поэтому некоторые из его графиков имеют нетрадиционную форму. Например, ток двигателя в режиме холостого хода незначительно отличается от тока в режиме номинальной нагрузки, а КПД двигателя весьма небольшой. Одной из причин, объясняющих это, является значительный намагничивающий ток двигателя, обусловленный отсутствием на роторе обмотки возбуждения и сравнительно большим средним размером воздушного зазора.

Анализируя результаты по определению моментов входа и выхода из синхронизма, удобно пользоваться для сравнения кратностями этих моментов. Следует указать, какое из отношений моментов представляет собой перегрузочную способность синхронного реактивного двигателя. Обобщая данные табл. 14.2, необходимо сделать вывод о характере влияния напряжения сети на величину рассматриваемых моментов  $M_{вх}$  и  $M_{вых}$ .

### Контрольные вопросы

1. Какова физическая сущность возникновения реактивного момента?
2. Какие применяются конструкции роторов в синхронных реактивных двигателях?
3. Чем объясняется значительная величина тока холостого хода у реактивного двигателя?
4. Что такое момент входа в синхронизм и момент выхода из синхронизма?
5. От каких параметров зависит величина этих моментов?
6. Что такое перегрузочная способность реактивного двигателя и как ее определить экспериментально?

## Глава 4

### КОЛЛЕКТОРНЫЕ МАШИНЫ

#### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 15

#### Исследование генератора постоянного тока независимого возбуждения

**Цель работы.** Изучить конструкцию генератора постоянного тока независимого возбуждения и приобрести практические навыки в сборке схем и опытном исследовании генератора при снятии

показаний и построении основных характеристик; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о генераторах постоянного тока независимого возбуждения.

### Программа работы

1. Ознакомиться с конструкцией генератора и приводного двигателя; записать паспортные данные генератора, двигателя, измерительных приборов и регулирующих устройств.

2. Собрать схему по рис. 15.1 и после проверки ее преподавателем произвести пробный пуск генератора; проверить возможность регулирования напряжения и нагрузки генератора.

3. Снять данные и построить характеристику холостого хода генератора; определить коэффициент магнитного насыщения.

4. Снять данные и построить нагрузочную характеристику генератора при номинальном токе нагрузки; построить характеристический треугольник при номинальном напряжении генератора и установить величину тока возбуждения, которая идет на компенсацию размагничивающего действия реакции якоря.

5. Снять показания и построить внешнюю характеристику генератора, определить номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки.

6. Снять данные и построить регулировочную характеристику генератора.

7. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

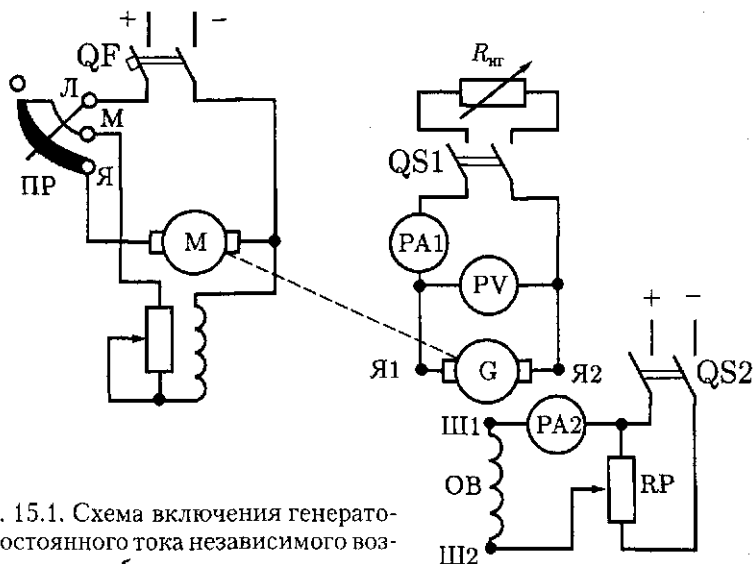


Рис. 15.1. Схема включения генератора постоянного тока независимого возбуждения

## Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал [5]: реакция якоря машины постоянного тока; учет размагничивающего действия реакции якоря; процесс работы и основные характеристики генератора независимого возбуждения — нагрузочная, внешняя, регулировочная и холостого хода.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

### Порядок выполнения работы

**Схема соединений.** В качестве приводного двигателя в схеме (рис. 15.1) применен двигатель постоянного тока параллельного возбуждения М. Порядок действий при пуске и регулировке частоты вращения этого двигателя изложен в лабораторной работе № 11. Генератор постоянного тока G имеет независимое возбуждение, т. е. его обмотка возбуждения ОВ электрически не соединена с обмоткой якоря и подключена к отдельному источнику постоянного тока через потенциометр РР.

Собрав схему по рис. 15.1, после проверки ее преподавателем, включением автомата QF пускают в ход приводной двигатель М. При этом рубильники QS1 и QS2 должны быть разомкнуты. Затем, установив номинальную частоту вращения приводного двигателя, замыкают QS2 и потенциометром РР устанавливают такую величину тока возбуждения  $I_b$  при которой напряжение на выходе генератора равно номинальному значению. После этого замыкают QS1 и проверяют возможность нагрузки генератора.

**Характеристика холостого хода** представляет собой зависимость ЭДС генератора в режиме холостого хода  $E_0$  от тока возбуждения  $I_b$  при номинальной частоте вращения  $n_{ном}$ . Данные для построения этой характеристики получают следующим образом. При разомкнутых QS1 и QS2 устанавливают номинальную частоту вращения якоря генератора и в течение всего опыта поддерживают ее неизменной. Затем измеряют ЭДС генератора  $E_{ост}$  (ЭДС остаточного магнетизма) и, включив QS2, потенциометром РР постепенно увеличивают ток возбуждения генератора до величины, при которой ЭДС генератора достигнет значения  $E_0 = 1,15 U_{ном}$ . При этом

Таблица 15.1

Намагничивание			Размагничивание		
Номер измерения	$E_0$ , В	$I_b$ , А	Номер измерения	$E_0$ , В	$I_b$ , А

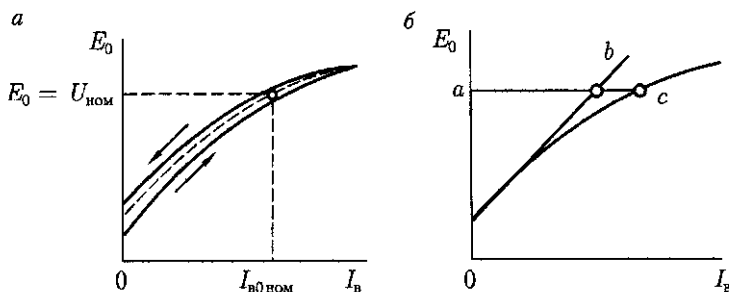


Рис. 15.2. Характеристика холостого хода генератора постоянного тока независимого возбуждения

через приблизительно одинаковые интервалы ЭДС  $E_0$  снимают показания вольтметра PV и амперметра PA2 и заносят их в табл. 15.1. Так получают данные для построения восходящей (намагничивающей) ветви характеристики холостого хода. При этом необходимо следить за тем, чтобы изменения тока возбуждения происходили только в направлении его нарастания. Затем потенциометром RP постепенно уменьшают ток возбуждения  $I_b$  до нуля и вновь снимают показания вольтметра PV и амперметра PA2 и заносят их в таблицу. Так получают данные нисходящей (размагничивающей) ветви характеристики холостого хода. В этом случае также необходимо, чтобы изменения тока возбуждения происходили только в направлении его уменьшения. Построив обе ветви характеристики холостого хода, проводят между ними среднюю линию, которую и принимают за характеристику холостого хода (рис. 15.2, а). Затем к характеристике холостого хода проводят касательную, а из точки  $a$  (рис. 15.2, б), соответствующей номинальному напряжению ( $E_0 = U_{ном}$ ) проводят прямую  $ac$ , параллельную оси абсцисс. Коэффициент магнитного насыщения

$$k_{\mu} = ac/ab. \quad (15.1)$$

Для машин постоянного тока  $k_{\mu} = 1,20 - 1,75$ .

**Нагрузочная характеристика** представляет собой зависимость напряжения генератора  $U$  от тока возбуждения  $I_b$  при неизменных значениях тока нагрузки  $I_o$  и частоты вращения  $n = n_{ном} = const$ . Данные нагрузочной характеристики снимают при номинальной нагрузке генератора. Установив номинальную частоту вращения, возбуждают и нагружают генератор (рубильники QS1 и QS2 замкнуты) таким образом, чтобы при напряжении  $U = U_{ном}$  ток нагрузки имел номинальное значение. Далее потенциометром RP уменьшают ток возбуждения до такого минимального значения, при котором ток нагрузки сохраняет номинальное значение (при  $n = n_{ном}$ ). Приблизительно через равные интервалы тока возбуждения сни-



Таблица 15.2

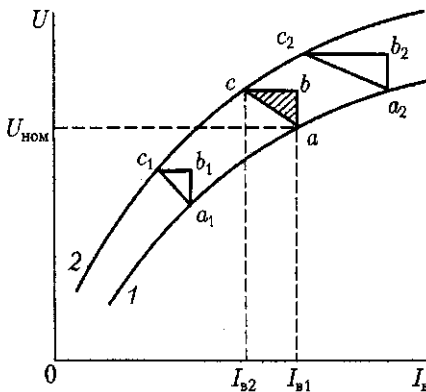
$U/U_{ном}$	1,15	1,0	0,85	0,75	0,5
$U, В$					
$I_a = I_{ном}, А$					
$I_b, А$					

мают показания вольтметра PV и амперметра PA2, заносят их в табл. 15.2. Затем строят нагрузочную характеристику. При снятии данных этой характеристики допускается изменять величину тока возбуждения только в направлении убывания.

Нагрузочную характеристику строят совместно с характеристикой холостого хода (рис. 15.3). Для построения характеристического треугольника на нагрузочной характеристике (кривая 1) отмечают точку  $a$ , соответствующую номинальному напряжению генератора. Затем откладывают вертикальный отрезок  $ab$ , равный падению напряжения в цепи якоря при номинальной нагрузке ( $I_{ном} \sum r_{75}$ ) и проводят горизонтальный отрезок  $cb$  до пересечения с характеристикой холостого хода (кривая 2). Сторона  $cb = I_{в1} - I_{в2}$  полученного треугольника  $abc$  представляет величину, эквивалентную МДС реакции якоря при номинальном режиме работы генератора. Построив ряд характеристических треугольников для различных напряжений, можно выяснить влияние реакции якоря при различных степенях магнитного насыщения магнитной системы машины:

$$c_1 b_1 < cb < c_2 b_2.$$

**Внешняя характеристика** генератора представляет собой зависимость напряжения на выходе генератора  $U$  от тока нагрузки  $I_a$  при номинальной частоте вращения якоря  $n_{ном}$  и неизменном токе возбуждения  $I_b = \text{const}$ . Для получения данных внешней характеристики генератора поступают следующим образом.



Устанавливают номинальную частоту вращения и, замкнув рубильники QS1 и QS2 (см. рис. 15.1), увеличивают ток возбуждения  $I_b$  и ток нагрузки  $I_a$  до тех

Рис. 15.3. Построение характеристического треугольника генератора постоянного тока

Таблица 15.3

$I_a / I_{\text{ном}}$	1,0	0,85	0,75	0,50	0
$I_a$ , А					
$U$ , В					
$I_b$ , А					

пор, пока генератор не окажется в режиме номинальной нагрузки:  $I_a = I_{a\text{ном}}$  и  $U = U_{\text{ном}}$ . После этого постепенно разгружают генератор, не изменяя величины тока возбуждения ( $I_b = \text{const}$ ) и поддерживая неизменной частоту вращения ( $n = \text{const}$ ). При этом через приблизительно одинаковые интервалы тока нагрузки снимают показания амперметра РА1 и вольтметра РВ. Показания приборов заносят в табл. 15.3. Затем строят внешнюю характеристику генератора  $U = f(I_a)$ .

Номинальное изменение напряжения генератора при сбросе нагрузки (%)

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{E_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100. \quad (15.2)$$

**Регулировочная характеристика** генератора — это зависимость тока возбуждения  $I_b$  от тока нагрузки  $I_a$  при номинальном напряжении  $U_{\text{ном}}$  и номинальной частоте вращения  $n_{\text{ном}}$ . Данные для построения регулировочной характеристики получают следующим образом. Устанавливают номинальную частоту вращения и возбуждают генератор до номинального напряжения. Затем подключают нагрузку (замыкают QS1) и постепенно увеличивают ток нагрузки до номинального значения  $I_{\text{ном}}$ . При этом ток возбуждения увеличивают так, чтобы напряжение на выходе генератора оставалось равным номинальному. Через приблизительно одинаковые интервалы тока нагрузки снимают показания амперметров РА1 и РА2 и заносят их в табл. 15.4. После этого процесс ведут в обратном направлении, т. е. уменьшают ток нагрузки вплоть до режима холостого хода и ток возбуждения так, чтобы напряжение на выходе генератора оставалось равным номинальному. При этом необходимо в первой части опыта ток возбуждения менять только в сторону уве-

Таблица 15.4

Номер измерения	Увеличение тока нагрузки		Уменьшение тока нагрузки	
	$I_w$ , А	$I_b$ , А	$I_w$ , А	$I_b$ , А

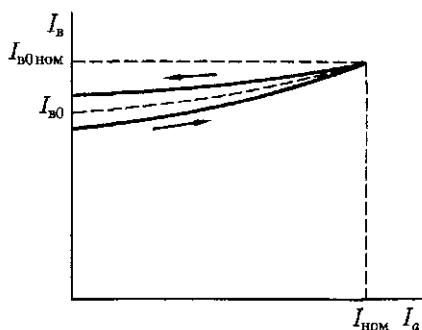


Рис. 15.4. Регулировочная характеристика генератора постоянного тока независимого возбуждения

личения, а во второй — в сторону уменьшения. Полученные в этом случае две ветви характеристики не совпадают (рис. 15.4), что объясняется явлением гистерезиса.

По данным табл. 15.4 строят две ветви характеристики. За регулировочную характеристику генератора принимают среднюю линию, проведенную между двумя ветвями.

### Анализ результатов лабораторной работы

Обобщив результаты лабораторной работы, следует проанализировать вид полученных графиков, сопровождая это необходимыми пояснениями и основываясь на физической сущности явлений, происходящих в рассматриваемом генераторе. Так, рассматривая характеристику холостого хода, следует объяснить причину расхождения ветвей этой характеристики при намагничивании и размагничивании генератора. Это же относится и к регулировочной характеристике.

При анализе внешней характеристики необходимо указать причины, вызывающие уменьшение напряжения на выходе генератора при увеличении нагрузки.

В заключение следует отметить, соответствуют ли номинальные параметры генератора, полученные опытным путем, его паспортным данным.

### Контрольные вопросы

1. Какие способы возбуждения применяют в генераторах постоянного тока?
2. Дайте определение основным характеристикам генератора: холостого хода, нагрузочной, внешней и регулировочной. При каких условиях снимают данные для построения каждой из них?
3. Какими исходными данными необходимо располагать для построения характеристического треугольника?
4. Почему нагрузочная характеристика располагается ниже характеристики холостого хода?
5. Почему ветви регулировочной характеристики, снятые при намагничивании и размагничивании генератора, не совпадают? Какая из них располагается выше?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 16

### Исследование генератора постоянного тока параллельного возбуждения

**Цель работы.** Изучить устройство генератора постоянного тока параллельного возбуждения и приобрести практические навыки в сборке схемы и опытном исследовании генератора по определению его основных характеристик; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах генераторов постоянного тока параллельного возбуждения.

#### Программа работы

1. Ознакомиться с конструкцией генератора и приводного двигателя; записать их паспортные данные и данные измерительных приборов.
2. Собрать схему по рис. 16.1 и после проверки ее преподавателем выполнить пробный пуск генератора; проверить соблюдение

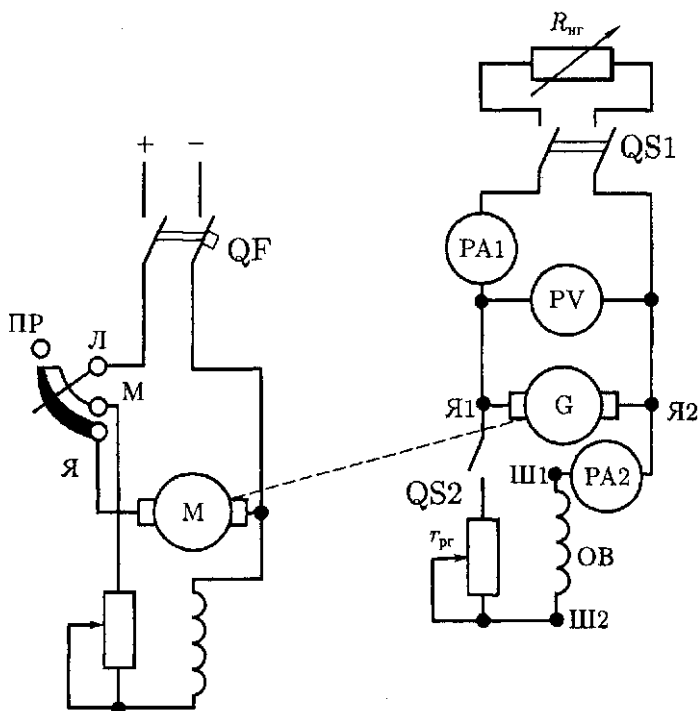


Рис. 16.1. Схема включения генератора постоянного тока параллельного возбуждения

условий самовозбуждения, возможность регулировки и нагрузки генератора.

3. Снять данные и построить характеристику самовозбуждения генератора.

4. Снять данные и построить внешнюю характеристику генератора и определить номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки.

5. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал [5]: условия самовозбуждения генераторов постоянного тока; генератор параллельного возбуждения — схема соединений, основные характеристики (самовозбуждения, внешняя, регулировочная).

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

### Порядок выполнения работы

**Схема соединений и условия самовозбуждения.** Представленная на рис. 16.1 схема соединений предусматривает применение двигателя постоянного тока параллельного возбуждения в качестве приводного двигателя. Порядок операций при пуске и регулировке частоты вращения этого двигателя изложен в лабораторной работе № 11.

Обмотка возбуждения исследуемого генератора включена параллельно обмотке якоря, а для регулировки тока возбуждения в цепи этой обмотки имеется регулировочный реостат  $r_{\text{рг}}$ . Работа генератора основана на принципе самовозбуждения.

После сборки схемы и проверки ее преподавателем автоматом QF включают приводной двигатель и устанавливают номинальную частоту вращения. Затем приступают к проверке условий самовозбуждения. При разомкнутых рубильнике QS1 и ключе QS2 вольтметром PV измеряют напряжение на выходе генератора. Если вольтметр PV показывает небольшое напряжение, созданное электродвижущей силой остаточного магнетизма, то это свидетельствует о соблюдении первого условия самовозбуждения — магнитная система генератора обладает остаточным магнетизмом. Если же магнитная система размагнитилась, то ее можно намагнитить, подключив обмотку возбуждения на некоторое время к источнику постоянного тока.

Затем устанавливают на реостате  $r_{\text{рг}}$  наибольшее сопротивление, замыкают ключ QS2 и, постепенно уменьшая сопротивление  $r_{\text{рг}}$ , наблюдают за показаниями вольтметра PV. При этом возможны три случая: а) напряжение генератора остается неизменным, что свидетельствует об обрыве цепи возбуждения (найти место обрыва и устранить его); б) напряжение генератора уменьшается, что указыва-

ет на неправильное подключение обмотки возбуждения к цепи обмотки якоря, при котором МДС обмотки возбуждения действует встречно магнитному потоку остаточного магнетизма и размагничивает машину; этот дефект можно устранить, изменив направление тока в обмотке возбуждения, т.е. поменять местами провода, подключенные к зажимам обмотки Ш1 и Ш2; в) напряжение генератора увеличивается — начинается процесс самовозбуждения.

**Характеристика самовозбуждения** представляет собой зависимость напряжения на зажимах генератора в режиме холостого хода  $U_0 = E_0$  от частоты вращения якоря  $n$  при неизменном сопротивлении цепи возбуждения ( $r_{pr} = \text{const}$ ). Установив номинальное напряжение генератора при отключенном рубильнике QS1 и номинальной частоте вращения, повышают частоту вращения до  $n = 1,2n_{ном}$ , а затем постепенно уменьшают ее и снимают пять показаний вольтметра PV и тахометра (либо другого измерителя частоты вращения). По этим показаниям строят характеристику самовозбуждения (рис. 16.2). Для уменьшения частоты вращения до весьма малых значений необходимо на время этого опыта подключить приводной двигатель к источнику постоянного тока с регулируемым напряжением. На некотором участке характеристики самовозбуждения при небольшой частоте вращения показания вольтметра PV не зависят от частоты вращения. Соответствующая этому явлению частота вращения называется критической  $n_{кр}$ . Из этого следует, что самовозбуждение генератора возможно лишь при частоте вращения, превышающей критическую. Величина  $n_{кр}$  зависит от сопротивления цепи возбуждения: с увеличением этого сопротивления величина  $n_{кр}$  возрастает. В этом можно убедиться при выполнении опыта.

**Внешняя характеристика** представляет собой зависимость напряжения на выходе генератора  $U$  от тока нагрузки  $I$  при неизменной частоте вращения  $n = n_{ном}$ , сопротивлении цепи возбуждения  $r_{pr} = \text{const}$ .

Включив приводной двигатель (автомат QF), подключают нагрузку (закрывают QS1) и замыкают цепь возбуждения (включают QS2). Регулируя сопротивление нагрузки  $R_{нг}$  и сопротивление регулировочного реостата  $r_{pr}$ , устанавливают номинальный режим работы генератора (частота вращения при этом должна быть номинальной и оставаться такой в течение всего опыта). Сняв показания вольтметра PV и амперметра PA1, уменьшают нагрузку (уве-

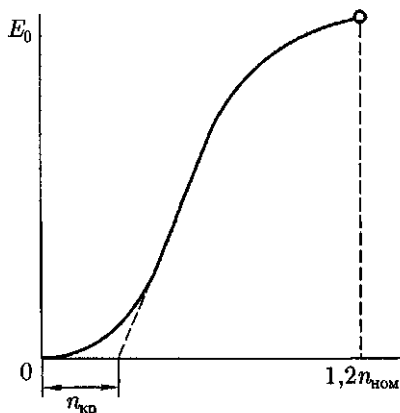


Рис. 16.2. Характеристика самовозбуждения

личивают сопротивление  $R_{нг}$ ), сопротивление  $r_{рг}$  должно оставаться при этом неизменным. Разгружая генератор вплоть до режима холостого хода, снимают не менее пяти показаний приборов и заносят их в таблицу, аналогичную табл. 15.3, а затем строят внешнюю характеристику генератора.

Номинальное изменение напряжения генератора при сбросе нагрузки определяется выражением (15.2).

### **Анализ результатов лабораторной работы**

Анализируя результаты лабораторной работы, устанавливают соответствие номинальных данных генератора, полученных опытным путем, его паспортным. При анализе характеристики самовозбуждения необходимо указать полученное значение критической частоты вращения. Для внешней характеристики генератора нужно перечислить причины, вызывающие уменьшение напряжения на выходе генератора при увеличении его нагрузки.

#### **Контрольные вопросы**

1. Каковы условия, необходимые для процесса самовозбуждения генератора постоянного тока?
2. Какое условие самовозбуждения нарушено, если при замыкании цепи возбуждения ЭДС генератора уменьшается до нуля?
3. Что представляет собой характеристика самовозбуждения?
4. Почему внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения имеет более падающий вид, чем внешняя характеристика генератора независимого возбуждения?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 17**

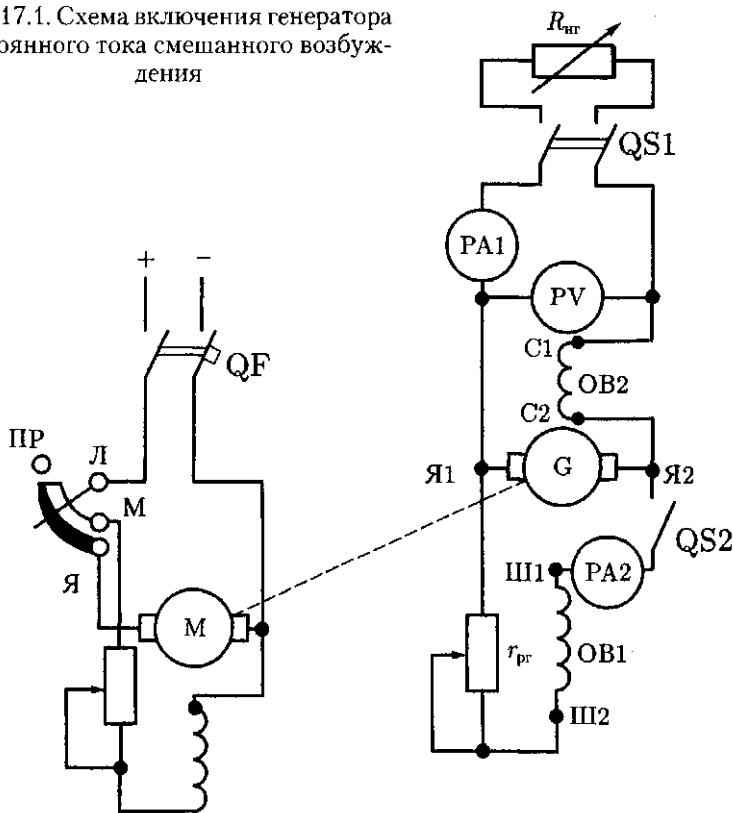
### **Исследование генератора постоянного тока смешанного возбуждения**

**Цель работы.** Изучить устройство генератора постоянного тока смешанного возбуждения и приобрести практические навыки в сборке схемы при опытном исследовании генератора по определению его свойств при различных способах подключения обмоток возбуждения; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах генератора постоянного тока смешанного возбуждения.

#### **Программа работы**

1. Ознакомиться с конструкцией генератора и приводного двигателя; записать паспортные данные генератора, двигателя и измерительных приборов.

Рис. 17.1. Схема включения генератора постоянного тока смешанного возбуждения



2. Собрать схему по рис. 17.1 и после проверки ее преподавателем выполнить пробный пуск генератора; проверить соблюдение условий самовозбуждения и возможность регулировки напряжения и нагрузки генератора.

3. Снять данные и построить внешние характеристики генератора: а) при встречном включении обмоток возбуждения; б) при согласном включении обмоток возбуждения; определить номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки для случая согласного включения обмоток.

4. Снять данные и построить регулировочную характеристику генератора при согласном включении обмоток возбуждения.

5. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал [5]: условия самовозбуждения генераторов постоянного тока; генератор смешанного возбуждения — принципиальная схема, согласное и встречное вклю-



чения обмоток возбуждения, внешние и регулировочные характеристики.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

### Порядок выполнения работы

**Схема соединения и условия самовозбуждения.** В качестве приводного двигателя в исследуемом генераторе применен двигатель постоянного тока параллельного возбуждения (рис. 17.1). Порядок операций при пуске и регулировке частоты вращения этого двигателя изложен в лабораторной работе № 11.

Ток возбуждения в параллельной обмотке возбуждения генератора ОВ1 регулируют с помощью реостата  $r_{рг}$ . В последовательной обмотке возбуждения ОВ2 током возбуждения является рабочий ток  $I$  генератора  $G$ . Работа генератора основана на принципе самовозбуждения. Проверка соблюдения условий самовозбуждения выполняется в порядке, изложенном в лабораторной работе № 16.

**Внешняя характеристика** генератора представляет собой зависимость напряжения  $U$  на выходе генератора от тока нагрузки  $I$  при номинальной частоте вращения и неизменном сопротивлении регулировочного реостата  $r_{рг}$ . Для получения данных внешней характеристики генератора при встречном соединении обмоток возбуждения автоматом QF включают приводной двигатель, возбуждают генератор до номинального напряжения при номинальной частоте вращения и нагружают генератор (включают QS1). При этом замечают, насколько уменьшилось напряжение на выходе генератора. Затем выключают приводной двигатель и меняют местами провода, присоединенные к зажимам последовательной обмотки возбуждения ОВ2 (зажимы С1 и С2). Вновь включают двигатель и, нагрузив генератор, отмечают величину уменьшения напряжения генератора. Встречное соединение обмоток возбуждения соответствует случаю наибольшего уменьшения напряжения на выходе генератора, вызванного подключением нагрузки.

Убедившись в том, что обмотки возбуждения генератора соединены согласно, включают приводной двигатель, устанавливают номинальную частоту вращения (поддерживая ее неизменной в течение всего опыта) и нагружают генератор до номинального тока нагрузки. При этом приблизительно через одинаковые интервалы тока  $I$  снимают показания амперметра РА1 и вольтметра PV и заносят их в табл. 17.1 (снимают не менее пяти показаний). Потом останавливают приводной двигатель и переключают провода, присоединенные к последовательной обмотке возбуждения ОВ2, т.е. переключают генератор на встречное возбуждение. Затем включают приводной двигатель, нагружают генератор и возбуждают его таким образом, чтобы при номинальном токе нагрузки его напряжение было

Таблица 17.1

Номер измерения	Согласное соединение		Встречное соединение	
	$I, A$	$U, B$	$I, A$	$U, B$

номинальным. Затем постепенно уменьшают ток нагрузки вплоть до холостого хода, поддерживая номинальную частоту вращения и не меняя сопротивления регулировочного реостата  $r_{рг}$ . Приблизительно через одинаковые интервалы тока нагрузки снимают показания амперметра PA1 и вольтметра PV (не менее пяти показаний), заносят их в табл. 17.1.

По данным таблицы строят две внешние характеристики генератора в одних осях координат (при согласном и встречном соединении обмоток возбуждения).

Для согласного включения обмоток возбуждения определяют номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки [см. (15.2)].

**Регулировочная характеристика** — это зависимость тока в параллельной обмотке возбуждения  $I_{в}$  от тока нагрузки  $I$  при номинальных значениях частоты вращения  $n_{ном}$  и напряжения  $U_{ном}$ . При согласном соединении обмоток возбуждения генератора включают приводной двигатель. Установив номинальную частоту вращения, возбуждают генератор до номинального напряжения  $U_0 = U_{ном}$ . Затем включают QS1, постепенно увеличивают нагрузку до номинальной и через приблизительно одинаковые интервалы тока нагрузки  $I$  снимают показания амперметров PA1 и PA2. Частоту вращения и напряжение на выходе генератора в течение всего опыта необходимо поддерживать номинальными. Снимают не менее пяти показаний приборов, заносят их в таблицу, аналогичную табл. 15.2, и строят регулировочную характеристику.

### Анализ результатов лабораторной работы

Установив соответствие номинальных параметров генератора, полученных опытным путем, его паспортным данным, переходят к анализу внешних характеристик генератора.

Сравнивая эти характеристики при встречном и согласном способах включения обмоток возбуждения, необходимо объяснить физический смысл явлений, вызывающих расхождение этих характеристик.

Полученное в работе значение номинального изменения напряжения при сбросе нагрузки  $\Delta U_{ном}$  следует сравнить со значением этой величины для генераторов независимого и параллельного способов возбуждения.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое встречное и согласное возбуждение у генераторов смешанного возбуждения?
2. Почему с увеличением нагрузки генератора смешанного возбуждения напряжение на выходе при встречном включении уменьшается в большей степени, чем при согласном включении обмоток возбуждения?
3. Как изменится форма внешних характеристик генератора смешанного возбуждения при согласном и встречном способах возбуждения, если уменьшить число витков в последовательной обмотке возбуждения?
4. Перечислите достоинства и недостатки генератора смешанного возбуждения по сравнению с генератором параллельного возбуждения.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 18**

### **Исследование двигателя постоянного тока параллельного возбуждения**

**Цель работы.** Изучить устройство двигателя постоянного тока параллельного возбуждения и приобрести практические навыки в сборке схемы при опытном исследовании двигателя для получения данных для построения его основных характеристик; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах двигателей постоянного тока параллельного возбуждения.

#### **Программа работы**

1. Ознакомиться с конструкцией двигателя и нагрузочного устройства; записать паспортные данные двигателя и измерительных приборов.
2. Собрать схему по рис. 18.1 и после проверки ее преподавателем произвести пробный пуск двигателя; проверить возможность регулировки частоты вращения и реверсирования.
3. Снять данные и построить регулировочную характеристику двигателя в режиме холостого хода.
4. Снять данные и построить рабочие характеристики двигателя.
5. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

#### **Подготовка к работе**

1. Повторить теоретический материал [5]: принцип действия и устройство двигателя постоянного тока, уравнение моментов для двигателя, частота вращения двигателя постоянного тока и способы ее регулировки; пуск двигателей постоянного тока; двигатель постоянного тока параллельного возбуждения — принципиальная схема, регулировочная и рабочие характеристики.

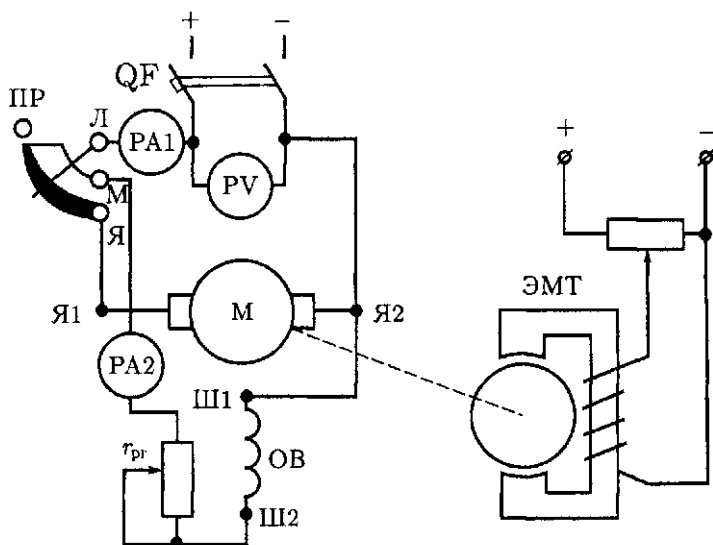


Рис. 18.1. Схема включения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

### Порядок выполнения работы

**Схема соединений и пробный пуск двигателя.** Схема соединений (рис. 18.1) включает вольтметр PV для контроля за напряжением в сети и два амперметра: PA1 — для измерения рабочего тока  $I$ , потребляемого двигателем из сети, и PA2 — для измерения тока в обмотке возбуждения  $I_{в}$ . Кроме того, в схеме имеется два реостата: ПР — пусковой реостат для ограничения пускового тока и  $r_{пр}$  — регулировочный реостат для регулирования тока в обмотке возбуждения  $I_{в}$ . В качестве нагрузочного устройства предусмотрен электромагнитный тормоз ЭМТ. Возможно применение и других видов нагрузочных устройств для создания на валу двигателя тормозного момента  $M_2$  (см. В.4).

Прежде чем включить двигатель в сеть, необходимо поставить рычаг пускового реостата ПР в положение «Пуск», соответствующее наибольшему сопротивлению реостата (см. В.3), а движок (рычаг) регулировочного реостата  $r_{пр}$  поставить в положение минимального сопротивления (в этом случае ток возбуждения, а следовательно, и магнитный поток окажутся наибольшими, что будет способствовать увеличению пускового момента двигателя).

После включения автомата QF рычаг ПР переводят на первую ступень и якорь двигателя приходит во вращение. Постепенно ры-

чаг реостата переводят в положение «Работа», а затем с помощью регулировочного реостата  $r_{\text{рг}}$  устанавливают требуемую частоту вращения.

При сборке схемы необходимо обратить особое внимание на надежность всех соединений в цепи обмотки возбуждения, а при работе двигателя и его регулировке следует следить, чтобы эти соединения не нарушались. Такая предосторожность вызвана опасностью «разноса» двигателя при обрыве в цепи возбуждения.

Для реверсирования (изменения направления вращения) двигателя необходимо изменить направление тока либо в обмотке возбуждения, либо в обмотке якоря. Если же одновременно изменить направление тока в обеих обмотках, то реверсирования не произойдет. В этом можно убедиться, поменяв местами провода, присоединенные к автомату QF.

**Регулировочная характеристика** двигателя постоянного тока параллельного возбуждения представляет собой зависимость частоты вращения  $n$  от тока в обмотке возбуждения  $I_{\text{в}}$  при неизменных напряжении питания  $U$  и нагрузке  $M_2$ . В данной работе регулировочную характеристику снимают в режиме холостого хода, т. е. при  $M_2 = 0$ .

После пуска двигателя при сопротивлении реостата  $r_{\text{рг}} = 0$  двигатель работает без какой-либо нагрузки. Затем постепенно увеличивают сопротивление  $r_{\text{рг}}$  до значения, при котором  $n = 1,2n_{\text{ном}}$ . При этом через приблизительно одинаковые интервалы частоты вращения снимают показания измерителя частоты вращения двигателя, например тахогенератора и амперметра РА2, и заносят их в табл. 18.1.

По полученным данным строят регулировочную характеристику двигателя  $n = f(I_{\text{в}})$ .

**Рабочие характеристики** представляют собой зависимость частоты вращения  $n$ , потребляемого тока  $I$ , полезного (нагрузочного) момента  $M_2$  и КПД  $\eta$  от полезной мощности  $P_2$  при неизменных значениях напряжения питания двигателя  $U$  и тока возбуждения  $I_{\text{в}}$ .

Для получения данных, необходимых для построения рабочих характеристик, включают двигатель и нагружают его до номинального тока нагрузки при номинальной частоте вращения. При этом снимают показания амперметров РА1 и РА2, вольтметра PV и электромагнитного тормоза ЭМТ. Затем постепенно разгружают двигатель до холостого хода и через приблизительно одинаковые интер-

Таблица 18.1

$n/n_{\text{ном}}$	0,6	0,8	1,0	1,1	1,2
$n$ , об/мин					
$I_{\text{в}}$ , А					

Таблица 18.2

Номер измерения и вычисления	Измерения					Вычисления		
	$U$ , В	$I$ , А	$I_{\text{н}}$ , А	$n$ , об/мин	$M_2$ , Н·м	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$\eta$ , %

валы тока нагрузки  $I$  снимают показания перечисленных приборов и заносят их в табл. 18.2. Снимают не менее пяти показаний.

Рассчитав значения потребляемой мощности (Вт)

$$P_1 = UI, \quad (18.1)$$

полезной мощности (Вт)

$$P_2 = 0,105M_2n \quad (18.2)$$

и КПД двигателя (%)

$$\eta = (P_2/P_1) 100, \quad (18.3)$$

строят рабочие характеристики двигателя в одних осях координат.

### Анализ результатов лабораторной работы

При анализе результатов лабораторной работы следует объяснить криволинейный вид регулировочной характеристики двигателя, а также форму рабочих характеристик двигателя. При анализе скоростной характеристики необходимо дать количественную оценку этой характеристике, рассчитав номинальное изменение частоты вращения двигателя при сбросе нагрузки (%):

$$\Delta n_{\text{ном}} = \frac{n_0 - n_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} 100. \quad (18.4)$$

Определив номинальные данные двигателя по его рабочим характеристикам, их следует сравнить с паспортными данными двигателя и сделать вывод об их соответствии.

### Контрольные вопросы

1. С какой целью при пуске двигателя параллельного возбуждения регулировочный реостат в цепи обмотки возбуждения выводят полностью?
2. Какие способы регулировки частоты вращения возможны в двигателях параллельного возбуждения?
3. Почему регулировочная характеристика двигателя параллельного возбуждения криволинейна?
4. Какие характеристики двигателя параллельного возбуждения называют рабочими?
5. Почему при увеличении нагрузки на вал двигателя параллельного возбуждения уменьшается частота вращения?
6. Как будет изменяться частота вращения двигателя постоянного тока при уменьшении напряжения питания?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 19

### Исследование двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

**Цель работы.** Изучить устройство двигателя постоянного тока последовательного возбуждения и приобрести практические навыки в сборке схемы соединений, включении и регулировке двигателя, а также в опытном исследовании двигателя для получения данных его основных характеристик; экспериментально подтвердить теоретические сведения о свойствах двигателей постоянного тока последовательного возбуждения.

#### Программа работы

1. Ознакомиться с конструкцией двигателя и нагрузочного устройства; записать паспортные данные двигателя и измерительных приборов.

2. Собрать схему по рис. 19.1 и после проверки ее преподавателем произвести пробный пуск двигателя, предварительно создав нагрузку на его валу.

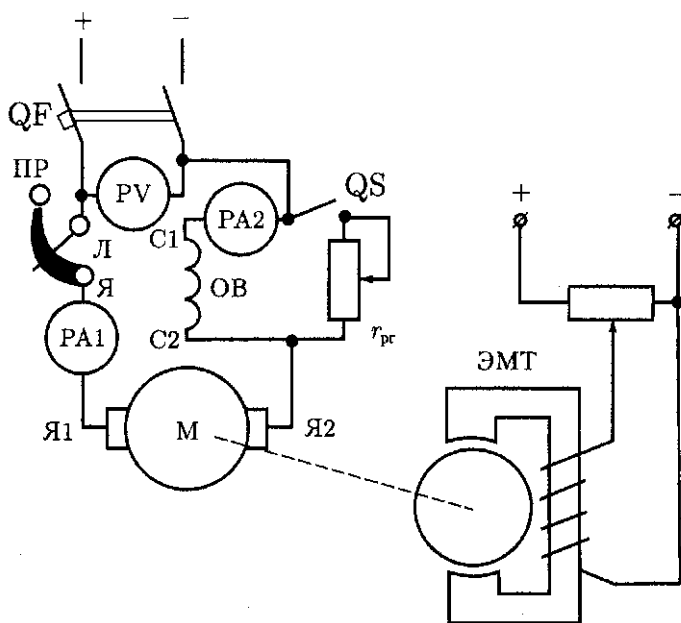


Рис. 19.1. Схема включения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

3. При разомкнутом ключе QS снять показания приборов и построить рабочие характеристики двигателя.

4. При замкнутом ключе QS (шунтирующем обмотку возбуждения) снять данные и построить график зависимости частоты вращения  $n$  от тока в обмотке возбуждения  $I_b$ .

5. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал [5]: двигатели постоянного тока последовательного возбуждения — принципиальная схема, электромагнитный момент и частота вращения, рабочие характеристики, сравнение с двигателями параллельного возбуждения.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

### Порядок проведения работы

**Схема соединений и пробный пуск двигателя.** Схема соединений двигателя последовательного возбуждения (рис. 19.1) включает двухзажимный пусковой реостат ПР, регулировочный реостат  $r_{рг}$ , шунтирующий обмотку возбуждения (подключается к обмотке возбуждения ключом QS), и два амперметра: PA1 — для измерения тока якоря  $I_a$  и PA2 — для измерения тока в обмотке возбуждения  $I_b$  (при разомкнутом ключе QS оба амперметра дают одинаковые показания). Напряжение сети контролируют посредством вольтметра PV. В качестве нагрузочного устройства в схеме предусмотрен электромагнитный тормоз ЭМТ.

Возможно применение и других нагрузочных устройств (см. В.4). Особенностью пуска двигателей последовательного возбуждения является необходимость нагрузки на их валу не менее 25 % от номинальной. Объясняется это тем, что частота вращения якоря двигателя обратно пропорциональна магнитному потоку  $\Phi$ , который при ненасыщенной магнитной цепи пропорционален току в обмотке возбуждения  $I_b$ , т. е. току якоря  $I_a$ , так как в рассматриваемом двигателе (при разомкнутом QS) эти токи одинаковы. Поэтому при отсутствии нагрузки на валу двигателя или при недостаточном ее значении, когда ток в якоре составляет меньшую величину, частота вращения достигает недопустимо больших значений и возникает опасность «разноса» двигателя. Учитывая это обстоятельство, необходимо следить за тем, чтобы двигатель постоянно находился под нагрузкой не менее 25 % от номинальной.

Создав нагрузку на двигатель, включают автомат QF и постепенно выводят сопротивление ПР (ключ QS при этом должен быть разомкнут). Затем, установив на регулировочном реостате  $r_{рг}$  максимальное сопротивление, замыкают ключ QS и медленно перемеща-



Таблица 19.1

Номер измерения	$U$ , В	$I_a$ , А	$n$ , об/мин	$M_2$ , Н·м	$P_2$ , Вт

ют движок (рычаг)  $r_{pr}$ , наблюдая за изменением частоты вращения двигателя.

**Рабочие характеристики** двигателя представляют собой зависимость частоты вращения  $n$ , момента  $M_2$  на валу и полезной мощности  $P_2$  от тока в обмотке якоря (тока нагрузки)  $I_a$  при номинальном напряжении питания  $U = U_{ном}$  при разомкнутом ключе QS. Включив двигатель, увеличивают нагрузку на его валу до значения, при котором ток якоря  $I_a = 1,2I_{ном}$ . Затем двигатель постепенно разгружают до значения тока нагрузки  $I_a = 0,25I_{ном}$ . При этом через приблизительно одинаковые интервалы тока  $I_a$  снимают показания приборов (не менее пяти показаний) и заносят их в табл. 19.1. Затем по (18.2) определяют полезную мощность двигателя.

По данным табл. 19.1 строят рабочие характеристики двигателя в одних осях координат.

**Характеристика  $n = f(I_B)$ .** После пуска двигателя увеличивают нагрузку на его валу до значения, при котором ток якоря  $I_a = 0,75I_{ном}$ . Измерив частоту вращения, замыкают ключ QS, предварительно установив на  $r_{pr}$  наибольшее сопротивление. Затем постепенно уменьшают сопротивление  $r_{pr}$  до тех пор, пока ток в обмотке возбуждения не достигнет значения  $I_B = 0,5I_a$ , что соответствует коэффициенту регулирования  $k_{рег} = I_B/I_a = 0,5$ . После этого, не меняя сопротивление  $r_{pr}$ , постепенно разгружают двигатель. При этом измеряют частоту вращения и ток возбуждения и заносят их значения в табл. 19.2.

Таблица 19.2

Параметр	Номер измерения				
	1	2	3	4	5
$n$ , об/мин					
$I_B$ , А					

Затем строят график зависимости  $n = f(I_B)$ .

### Анализ результатов лабораторной работы

Анализируя результаты лабораторной работы, необходимо в первую очередь установить соответствие номинальных данных исследуемого двигателя, полученных опытным путем, его паспортным параметрам. Далее следует проанализировать рабочие характери-

стики двигателя. Необходимо отметить наиболее целесообразную область применения двигателей постоянного тока последовательного возбуждения, исходя из их рабочих свойств.

### **Контрольные вопросы**

1. Почему не допускается включение двигателя последовательного возбуждения с нагрузкой менее 25 % от номинальной?
2. Что представляют собой рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения?
3. Какие способы регулирования частоты вращения возможны в двигателях последовательного возбуждения?
4. Чем объясняются особые свойства двигателей последовательного возбуждения по сравнению с двигателями параллельного возбуждения?
5. Для привода каких механизмов в основном применяют двигатели последовательного возбуждения?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 20**

### **Исследование двигателя постоянного тока смешанного возбуждения**

**Цель работы.** Изучить устройство двигателя постоянного тока смешанного возбуждения и приобрести практические навыки в сборке схемы соединений, включении и регулировке двигателя, а также опытным исследованием двигателя для получения рабочих характеристик; экспериментально подтвердить сведения о свойствах двигателей постоянного тока смешанного возбуждения.

### **Программа работы**

1. Ознакомиться с конструкцией двигателя и нагрузочного устройства; записать паспортные данные двигателя и измерительных приборов.
2. Собрать схему по рис. 20.1 и после проверки ее преподавателем произвести пробный пуск двигателя и убедиться в возможности регулировки частоты вращения.
3. Снять показания приборов и построить рабочие характеристики двигателя при согласном включении обмоток возбуждения.
4. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

### **Подготовка к работе**

1. Повторить теоретический материал [5]: двигатель постоянного тока смешанного возбуждения — принципиальная схема, согласное и встречное включение обмоток возбуждения, рабочие характеристики, области применения.

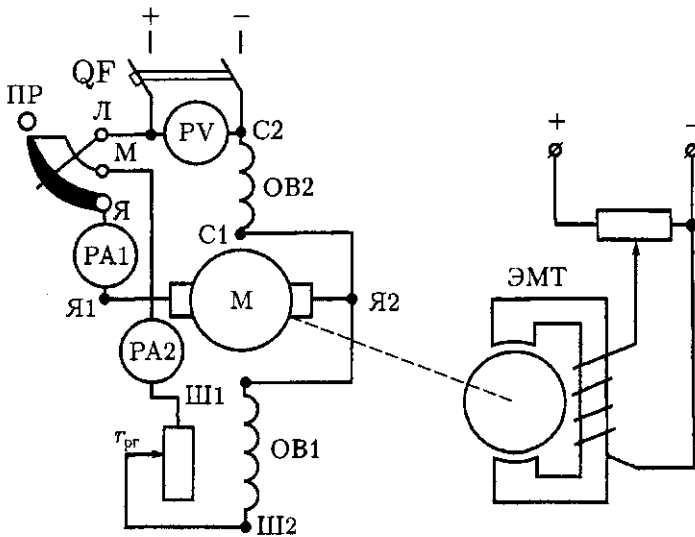


Рис. 20.1. Схема включения двигателя постоянного тока смешанного возбуждения

2. Подготовить в рабочей тетради таблицу для занесения результатов опыта и координатную сетку для построения рабочих характеристик.

### Порядок проведения работы

**Схема соединений и пробный пуск двигателя.** Схема включения двигателя смешанного возбуждения (рис. 20.1) содержит трехзажимный пусковой реостат ПР и регулировочный реостат  $r_{пр}$ , включенный в цепь параллельной обмотки возбуждения ОВ1. В схеме имеются два амперметра: РА1 — для измерения тока  $I$ , потребляемого двигателем из сети, и РА2 — для измерения тока возбуждения  $I_v$ . Для контроля напряжения сети в схеме предусмотрен вольтметр PV. Для механической нагрузки двигателя в установке применен электромагнитный тормоз ЭМТ. Возможно применение и других нагрузочных устройств (см. В.4).

Двигатель смешанного возбуждения имеет две обмотки возбуждения: параллельную ОВ1 и последовательную ОВ2. Возможны два способа соединения этих обмоток: согласное и встречное.

При *согласном* включении обмоток результирующий магнитный поток двигателя создается суммой МДС обмоток возбуждения:

$$F_{рез} = F_{ОВ1} + F_{ОВ2},$$

где  $F_{ОВ1}$  — МДС параллельной обмотки возбуждения;  $F_{ОВ2}$  — МДС последовательной обмотки возбуждения.

Результирующий магнитный поток двигателя в этом случае с увеличением нагрузки (с повышением тока  $I$ ) возрастает (за счет МДС  $F_{OB2}$ ), что приводит к уменьшению частоты вращения.

При *встречном* включении обмоток возбуждения результирующий магнитный поток двигателя создается разностью МДС обмоток возбуждения:

$$F_{\text{рез}} = F_{OB1} - F_{OB2}.$$

Поэтому с ростом нагрузки результирующий магнитный поток двигателя ослабляется (за счет МДС  $F_{OB2}$ ), что ведет к увеличению частоты вращения. Такая зависимость частоты вращения двигателя от нагрузки приводит к неустойчивой работе двигателя. По этой причине двигатели смешанного возбуждения применяют преимущественно с согласным включением обмоток возбуждения.

Собрав схему по рис. 20.1, после проверки ее преподавателем определяют способ соединения обмоток возбуждения. Для этого двигатель включают в сеть, устанавливают номинальную частоту вращения (посредством регулировочного реостата  $r_{\text{пр}}$ ) и постепенно нагружают его, наблюдая за изменением частоты вращения. Если с увеличением нагрузки частота вращения уменьшается, то это свидетельствует о согласном включении обмоток возбуждения. Если же обнаружено увеличение частоты вращения, то это указывает на встречное включение обмоток и тогда двигатель следует остановить и поменять местами провода, присоединенные к последовательной обмотке возбуждения (С1 — С2).

**Рабочие характеристики.** Проверив положение пускового и регулировочного реостатов, включают автомат QF и пускают двигатель. Затем посредством ЭМТ постепенно нагружают двигатель до номинального значения тока нагрузки при номинальной частоте вращения. После этого постепенно разгружают двигатель вплоть до режима холостого хода и приблизительно через одинаковые интервалы убывающего тока нагрузки снимают показания приборов (не менее пяти показаний) и заносят их в табл. 20.1.

Таблица 20.1

Номер измерения и вычисления	Измерения				Вычисления		
	$U$ , В	$I$ , А	$n$ , об/мин	$M_2$ , Н·м	$P_1 = UI$ , Вт	$P_2 = 0,105 M_2 n_2$ , Вт	$\eta = (P_2/P_1)100$ , %

Сделав необходимые вычисления, строят рабочие характеристики двигателя, представляющие собой зависимость частоты вращения  $n$ , потребляемой  $P_1$  и полезной  $P_2$  мощностей, полезного момента  $M_2$  и КПД  $\eta$  от потребляемого тока  $I$  при номинальном напряжении питания  $U_{\text{ном}}$  и неизменном токе в параллельной обмотке возбуждения ОВ1.

### **Анализ результатов лабораторной работы**

Анализ результатов лабораторной работы начинают с установления соответствия номинальных данных двигателя, полученных опытным путем, его паспортным параметрам. Затем переходят к анализу рабочих характеристик. При этом особое внимание уделяют скоростной  $n = f(I)$  и моментной  $M_2 = f(I)$  характеристикам. Эти характеристики необходимо сравнить с аналогичными характеристиками двигателя последовательного возбуждения (см. лабораторную работу № 19), объяснив причины, обусловившие различие этих характеристик.

В заключение сравнивают двигатель смешанного возбуждения с двигателями параллельного и последовательного возбуждения, указав на его достоинства и недостатки.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Что такое согласное и встречное включения обмоток возбуждения и как они влияют на свойства двигателя смешанного возбуждения?
2. Почему при пуске двигателей смешанного возбуждения не требуется предварительной нагрузки двигателя?
3. Сравните регулировочные свойства двигателей смешанного и последовательного способов возбуждения.
4. Если в двигателе смешанного возбуждения уменьшить число витков в последовательной обмотке возбуждения, то как изменятся свойства этого двигателя?
5. Каковы достоинства и недостатки двигателя смешанного возбуждения по сравнению с двигателями параллельного и последовательного возбуждения?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 21**

### **Исследование универсального коллекторного двигателя**

**Цель работы.** Изучить конструкцию универсального коллекторного двигателя и приобрести практические навыки в сборке схемы и включении двигателя, а также в опытном исследовании двигателя и построении его рабочих характеристик; экспериментально подтвердить свойства универсального коллекторного двигателя.

## Программа работы

1. Ознакомиться с конструкцией двигателя и нагрузочным устройством; записать паспортные данные двигателя и измерительных приборов.

2. Собрать схему по рис. 21.1 и после проверки ее преподавателем выполнить пробный пуск двигателя на постоянном и переменном токах.

3. Снять показания приборов и построить рабочие характеристики двигателя для случаев его работы от сети постоянного и переменного токов.

4. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

## Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал [5]: устройство универсального коллекторного двигателя, особенности коммутации на переменном токе; принципиальная схема двигателя, сравнение рабочих характеристик двигателя при постоянном и переменном токах.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатную сетку для построения рабочих характеристик.

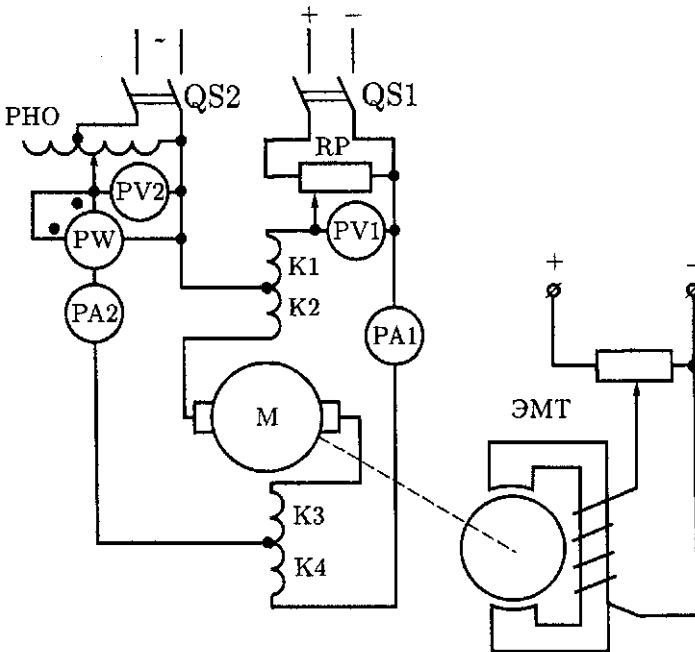


Рис. 21.1. Схема включения универсального коллекторного двигателя

Сделав необходимые вычисления, строят рабочие характеристики двигателя, представляющие собой зависимость частоты вращения  $n$ , потребляемой  $P_1$  и полезной  $P_2$  мощностей, полезного момента  $M_2$  и КПД  $\eta$  от потребляемого тока  $I$  при номинальном напряжении питания  $U_{ном}$  и неизменном токе в параллельной обмотке возбуждения ОВ1.

### **Анализ результатов лабораторной работы**

Анализ результатов лабораторной работы начинают с установления соответствия номинальных данных двигателя, полученных опытным путем, его паспортным параметрам. Затем переходят к анализу рабочих характеристик. При этом особое внимание уделяют скоростной  $n = f(I)$  и моментной  $M_2 = f(I)$  характеристикам. Эти характеристики необходимо сравнить с аналогичными характеристиками двигателя последовательного возбуждения (см. лабораторную работу № 19), объяснив причины, обусловившие различие этих характеристик.

В заключение сравнивают двигатель смешанного возбуждения с двигателями параллельного и последовательного возбуждения, указав на его достоинства и недостатки.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое согласное и встречное включения обмоток возбуждения и как они влияют на свойства двигателя смешанного возбуждения?
2. Почему при пуске двигателей смешанного возбуждения не требуется предварительной нагрузки двигателя?
3. Сравните регулировочные свойства двигателей смешанного и последовательного способов возбуждения.
4. Если в двигателе смешанного возбуждения уменьшить число витков в последовательной обмотке возбуждения, то как изменятся свойства этого двигателя?
5. Каковы достоинства и недостатки двигателя смешанного возбуждения по сравнению с двигателями параллельного и последовательного возбуждения?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 21**

### **Исследование универсального коллекторного двигателя**

**Цель работы.** Изучить конструкцию универсального коллекторного двигателя и приобрести практические навыки в сборке схемы и включении двигателя, а также в опытном исследовании двигателя и построении его рабочих характеристик; экспериментально подтвердить свойства универсального коллекторного двигателя.

## Программа работы

1. Ознакомиться с конструкцией двигателя и нагрузочным устройством; записать паспортные данные двигателя и измерительных приборов.
2. Собрать схему по рис. 21.1 и после проверки ее преподавателем выполнить пробный пуск двигателя на постоянном и переменном токах.
3. Снять показания приборов и построить рабочие характеристики двигателя для случаев его работы от сети постоянного и переменного токов.
4. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

## Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал [5]: устройство универсального коллекторного двигателя, особенности коммутации на переменном токе; принципиальная схема двигателя, сравнение рабочих характеристик двигателя при постоянном и переменном токах.
2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатную сетку для построения рабочих характеристик.

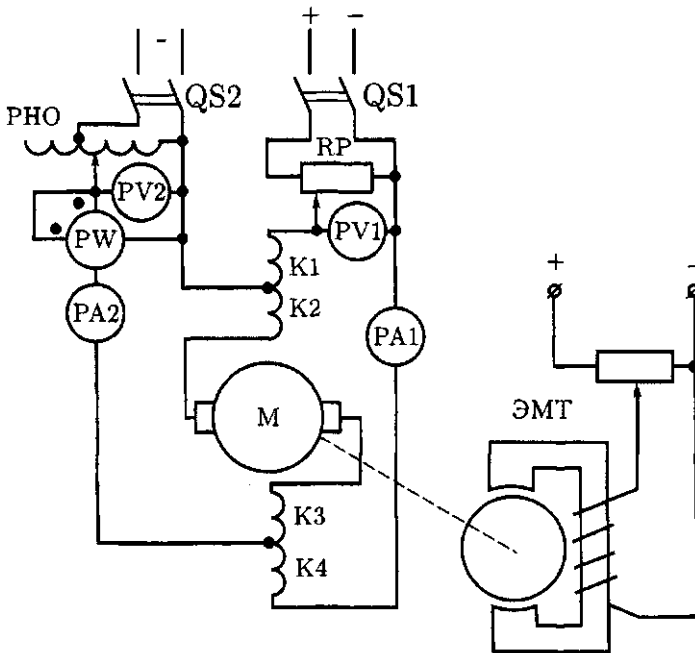


Рис. 21.1. Схема включения универсального коллекторного двигателя



## Порядок выполнения работы

**Схема соединений и пробный пуск двигателя.** Универсальные коллекторные двигатели по своему устройству почти не отличаются от двигателей постоянного тока последовательного возбуждения. Разница состоит лишь в том, что магнитная система универсальных двигателей полностью шихтованная из тонколистовой электротехнической стали. На двух явно выраженных полюсах универсального двигателя располагают четыре полюсные катушки (К1, К2, К3 и К4), соединенные последовательно между собой и с обмоткой якоря (рис. 21.1). При включении двигателя в сеть постоянного тока используют четыре полюсные катушки, а при включении в сеть переменного тока — только две (К2 и К3). Благодаря такому способу включения свойства двигателя на постоянном и переменном токах оказываются приблизительно одинаковыми. Однако точного совпадения характеристик универсального двигателя при его работе на постоянном и переменном токах добиться невозможно.

Универсальные двигатели обычно изготавливают мощностью до 300 Вт, поэтому хотя они и имеют последовательное возбуждение их можно включать без предварительной нагрузки на валу. Объясняется это тем, что силы трения, возникающие в самом двигателе (в подшипниках и в щеточно-коллекторном узле), являются достаточными для ограничения частоты вращения.

На представленной на рис. 21.1 схеме включение двигателя выполняется либо рубильником QS1 (в сеть постоянного тока), либо рубильником QS2 (в сеть переменного тока). Потенциометр RP и однофазный регулятор напряжения РНО позволяют регулировать напряжение, подводимое к двигателю. В цепь постоянного тока включены амперметр PA1 и вольтметр PV1, в цепь переменного тока — амперметр PA2, вольтметр PV2 и ваттметр PW. В качестве нагрузочного устройства в установке использован электромагнитный тормоз ЭМТ. Возможно применение и другого нагрузочного устройства (см. В.4).

Таблица 21.1

Номер измерения и вычисления	Измерения				Вычисления		
	$U$ , В	$I$ , А	$n$ , об/мин	$M_2$ , Н·м	$P_1 = UI$ , Вт	$P_2 = 0,105 M_2 n_2$ , Вт	$\eta = (P_2/P_1)100$ , %

Таблица 21.2

Номер измерения и вычисления	Измерения					Вычисления	
	$U$ , В	$I$ , А	$n$ , об/мин	$M_2$ , Н·м	$P_1$ , Вт	$P_2 = 0,105 M_2 n$ , Вт	$\eta = (P_2/P_1)100$ , %

После сборки схемы и проверки ее преподавателем производят пробный пуск двигателя сначала на постоянном (включают QS1), а затем на переменном токе (включают QS2). При каждом включении следует проверить возможность регулировки частоты вращения двигателя изменением подводимого к двигателю напряжения.

#### Рабочие характеристики.

Сначала включают двигатель в сеть постоянного тока (замыкают QS1) и нагружают его посредством ЭМТ до номинального тока нагрузки  $I = I_{\text{ном}}$ . Затем постепенно разгружают двигатель до режима холостого хода и приблизительно через одинаковые интервалы тока нагрузки снимают показания приборов и заносят их в табл. 21.1. Затем рубильник QS1 отключают и опыт повторяют на переменном токе (включают QS2) и показания приборов заносят в табл. 21.2. Как в первом, так и во втором случаях напряжение питания двигателя во время опытов необходимо поддерживать неизменным и равным номинальному. Выполнив вычисления по формулам, приведенным в табл. 21.1 и 21.2, строят графики рабочих характеристик при работе двигателя на

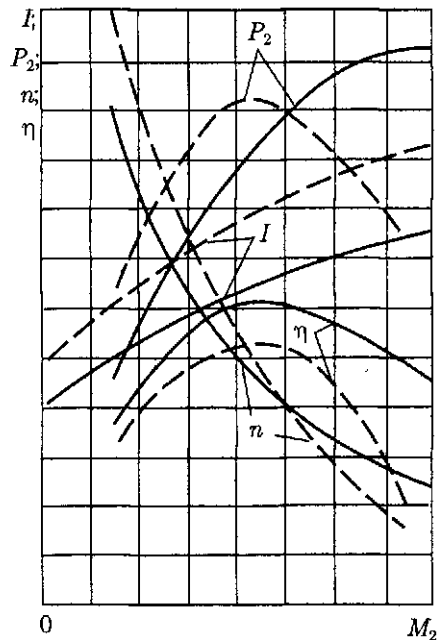


Рис. 21.2. Рабочие характеристики универсального коллекторного двигателя при постоянном (—) и переменном (---) токах

постоянном и переменном токах. Примерный вид этих характеристик показан на рис. 21.2.

### **Анализ результатов лабораторной работы**

Вначале устанавливают соответствие номинальных данных универсального двигателя на постоянном и переменном токах, полученных опытным путем, паспортным данным этого двигателя. Затем путем сравнения одноименных графиков рабочих характеристик двигателя при его работе на постоянном и переменном токах выясняют, по каким параметрам свойства двигателя на постоянном токе отличаются от его свойств на переменном токе. При этом необходимо указать причины, обусловившие разницу этих параметров.

#### **Контрольные вопросы**

1. С какой целью магнитную систему универсального двигателя делают шихтованной?
2. Для чего при включении универсального двигателя в сеть переменного тока уменьшают число витков в его обмотке возбуждения?
3. Почему универсальные коллекторные двигатели делают только с последовательным возбуждением?
4. Почему при работе от сети переменного тока потребляемый универсальным двигателем ток больше, чем при работе от сети постоянного тока, а КПД, наоборот, меньше?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 22**

### **Определение КПД машины постоянного тока методом холостого хода**

**Цель работы.** Приобрести практические навыки по определению КПД машины постоянного тока методом холостого хода; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о видах потерь в машине постоянного тока, их зависимости от нагрузки машины, а также зависимости КПД машины от нагрузки.

#### **Программа работы**

1. Ознакомиться с конструкцией машины постоянного тока; записать паспортные данные машины и измерительных приборов.
2. Собрать схему по рис. 22.1 и после проверки ее преподавателем измерить электрическое сопротивление обмоток, включенных последовательно в цепь якоря.
3. Собрать схему по рис. 22.2 и после проверки ее преподавателем выполнить опыт холостого хода машины постоянного тока в режиме двигателя.

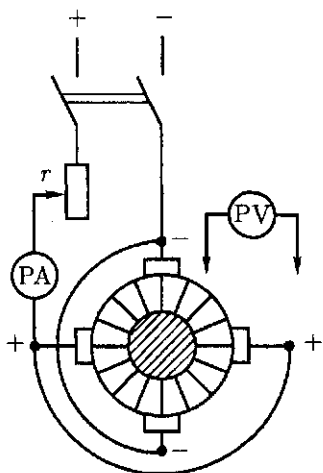


Рис. 22.1. Измерение сопротивления обмотки якоря

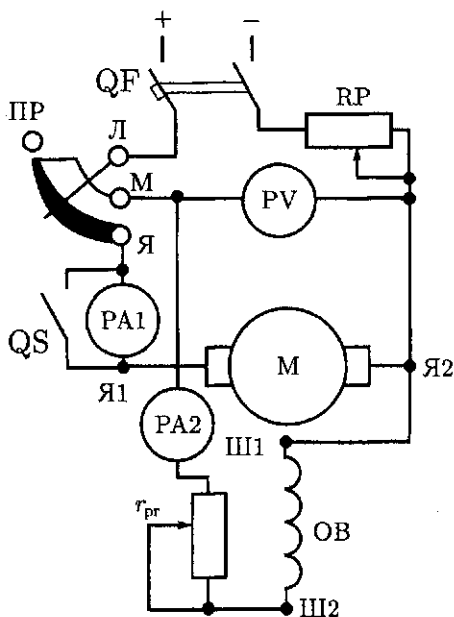


Рис. 22.2. Схема включения двигателя постоянного тока при опыте холостого хода

4. Рассчитать потери машины постоянного тока при различных значениях тока нагрузки и построить график зависимости КПД машины постоянного тока от тока нагрузки.

5. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал [5]: виды потерь в машинах постоянного тока — основные и добавочные, магнитные, механические и электрические; зависимость потерь от нагрузки (потери постоянные и переменные); КПД машины постоянного тока, его зависимость от нагрузки машины, а также условия получения максимального КПД.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатную сетку для построения графика.

### Основные понятия

Часть мощности, подводимой к машине постоянного тока, расходуется на покрытие потерь. Различают два вида потерь — основные и добавочные. **Основные потери** разделяют на магнитные, механические и электрические.

Магнитные потери происходят в сердечнике якоря в процессе его перемагничивания и наведения в нем вихревых токов. Эти потери зависят от частоты вращения якоря (частоты перемагничивания) и величины основного магнитного потока, пропорционального ЭДС обмотки якоря  $E_a$ .

Механические потери обусловлены трением в подшипниках, на коллекторе, а также трением вращающихся частей о воздух. Механические потери зависят от частоты вращения.

Магнитные и механические потери называют *постоянными потерями*, так как мощность этих потерь не зависит от нагрузки машины. Аналитический расчет магнитных и механических потерь является сложной задачей и не дает достаточной точности. Для определения этих потерь иногда пользуются экспериментальным методом, заключающимся в выполнении опыта холостого хода. При этом измеряют ток якоря в режиме холостого хода  $I_{a0}$ , подведенное напряжение  $U_0$  и определяют мощность холостого хода в цепи якоря (Вт), которая представляет собой сумму магнитных и механических потерь:

$$P_{a0} = U_0 I_{a0} = P_m + P_{\text{мех}} \quad (22.1)$$

Пользуясь этим методом, нужно помнить, что для получения правильных результатов необходимо подвести к двигателю такое напряжение  $U_0$ , чтобы ЭДС якоря в режиме холостого хода  $E_{a0}$  была равна ЭДС якоря в режиме номинальной нагрузки двигателя  $E_{a \text{ ном}}$ .

Известно, что ЭДС якоря в двигательном режиме машины меньше подведенного напряжения на величину падения напряжения  $I_a \sum r_{75}$  в обмотках, включенных последовательно в цепь якоря (обмотка якоря, обмотка добавочных полюсов и т. д.), и падения напряжения  $\Delta U_{\text{щ}}$  в щетках. Учитывая это, можно записать выражение ЭДС якоря (В):

для режима холостого хода

$$E_{a0} = U_0 - I_{a0} \sum r_{75} - \Delta U_{\text{щ}} (I_{a0} / I_{a \text{ ном}}); \quad (22.2)$$

для режима номинальной нагрузки

$$E_{a \text{ ном}} = U_{\text{ном}} - I_{a \text{ ном}} \sum r_{75} - \Delta U_{\text{щ}} \quad (22.3)$$

Принимая во внимание условие равенства ЭДС якоря, необходимое для опыта холостого хода ( $E_{a0} = E_{a \text{ ном}}$ ) и приравняв (22.2) к (22.3), получим значение напряжения холостого хода  $U_0$ , которое следует подвести к двигателю при выполнении опыта холостого хода:

$$U_0 = U_{\text{ном}} - (I_{a \text{ ном}} - I_{a0}) \sum r_{75} - \Delta U_{\text{щ}} (I_{a0} / I_{a \text{ ном}}), \quad (22.4)$$

где  $\sum r_{75}$  — сумма сопротивлений обмоток в цепи якоря, приведенных к рабочей температуре 75 °С, Ом;  $I_{a \text{ ном}}$  и  $I_{a0}$  — токи в цепи якоря в режимах номинальной нагрузки и холостого хода соответственно, А;  $\Delta U_{\text{щ}}$  — падение напряжения на щетках, обычно  $\Delta U_{\text{щ}} = 2$  В.

Электрические потери в машине постоянного тока — это потери, обусловленные прохождением тока в обмотках и щетках машины:

электрические потери в цепи обмотки возбуждения (Вт)

$$P_{э.в} = U_{ном} I_{в.ном}; \quad (22.5)$$

электрические потери в обмотках (Вт) включенных последовательно в цепь якоря,

$$P_{э.а} = I_a^2 \sum r_{75}; \quad (22.6)$$

электрические потери в щеточном контакте (Вт)

$$P_{э.щ} = I_a \Delta U_{щ}; \quad (22.7)$$

где  $I_{в.ном}$  — ток возбуждения при номинальной частоте вращения, А.

Электрические потери в обмотках цепи якоря и в щеточном контакте называют *переменными*, так как их значения зависят от нагрузки машины.

**Добавочные потери** представляют собой сумму трудно учитываемых потерь (магнитные потери в полюсных наконечниках, вызванные пульсацией магнитной индукции в воздушном зазоре, потери от вихревых токов в медных стержнях обмотки якоря и т. п.). Величина добавочных потерь принимается равной 1 % от подводимой к двигателю мощности (Вт):

$$P_{доб} = 0,01 UI. \quad (22.8)$$

Сумма всех потерь (Вт)

$$\sum P = P_{а0} + P_{э.в} + P_{э.а} + P_{э.щ} + P_{доб}. \quad (22.9)$$

КПД машины постоянного тока (%)

$$\eta = (P_2/P_1)100, \quad (22.10)$$

где

$$P_2 = P_1 - \sum P. \quad (22.11)$$

### Порядок выполнения работы

**Электрическое сопротивление обмоток в цепи якоря.** Сопротивления измеряют методом вольтметра — амперметра. С этой целью собирают схему по рис. 22.1 и после проверки ее преподавателем подключают к источнику постоянного тока, а затем реостатом  $r$  устанавливают в цепи ток  $I = (0,1 - 0,2)I_{ном}$ . К пластинам коллектора, на которые наложены щетки разной полярности, с помощью щупов присоединяют вольтметр и измеряют напряжение  $U_a$ . Опыт проводят на «холодных» обмотках, т. е. при температуре обмоток, практически не отличающейся от температуры окружающей среды.

Таблица 22.1

Номер измерения	Обмотка якоря				Обмотка добавочных полюсов			$\Sigma r_{75}, \text{ Ом}$
	$U_a, \text{ В}$	$I_a, \text{ А}$	$r_a, \text{ Ом}$	$r_{a \text{ ср}}, \text{ Ом}$	$U_{\text{доб.п}}, \text{ В}$	$I_{\text{доб.п}}, \text{ А}$	$r_{\text{доб.п}}, \text{ Ом}$	
1								
2								
3								

Измерение повторяют три раза при разных положениях якоря и результаты заносят в табл. 22.1. Сопротивление обмотки якоря при каждом измерении (Ом)

$$r_a = U_a / I_a \quad (22.12)$$

За электрическое сопротивление обмотки якоря принимают среднее арифметическое значение сопротивлений при трех измерениях (Ом)

$$r_{a \text{ ср}} = (r_{a1} + r_{a2} + r_{a3}) / 3. \quad (22.13)$$

После этого щупы вольтметра прикладывают к выводам обмотки добавочных полюсов, измеряют напряжение  $U_{\text{доб.п}}$  и ток  $I_{\text{доб.п}}$  и определяют электрическое сопротивление этой обмотки (Ом)

$$r_{\text{доб.п}} = U_{\text{доб.п}} / I_{\text{доб.п}}. \quad (22.14)$$

Если в цепи якоря имеются еще какие-либо обмотки, то их сопротивление находят аналогичным образом.

Суммарное сопротивление обмоток в цепи якоря (Ом)

$$\Sigma r = r_{a \text{ ср}} + r_{\text{доб.п}} + \dots \quad (22.15)$$

Полученное значение сопротивления  $\Sigma r$  приводят к рабочей температуре  $75^\circ\text{C}$ :

$$\Sigma r_{75} = \Sigma r [1 + \alpha(75 - \theta_1)], \quad (22.16)$$

где  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления, для меди  $\alpha = 0,004$ ;  $\theta_1$  — температура окружающей среды,  $^\circ\text{C}$ .

Приведенное к рабочей температуре значение сопротивления  $\Sigma r_{75}$  заносят в табл. 22.1.

**Опыт холостого хода.** Собирают схему по рис. 22.2 и после проверки ее преподавателем выполняют опыт холостого хода машины

Таблица 22.2

$U_{\text{ном}}, \text{ В}$	$I_{a \text{ ном}}, \text{ А}$	$I'_{a0}, \text{ А}$	$I_{\text{в. ном}}, \text{ А}$	$P_{\text{э. в}}, \text{ Вт}$	$\Delta U_{\text{ш}}, \text{ В}$	$U_0, \text{ В}$	$I_{a0}, \text{ А}$	$P_{a0}, \text{ Вт}$

постоянного тока в режиме двигателя. Для этого автоматом QF включают двигатель в сеть, предварительно замкнув ключ QS, шунтирующий амперметр PA1, и устанавливают потенциометром RP номинальное напряжение  $U_{ном}$ , а регулировочным реостатом  $r_{рг}$  — номинальную частоту вращения. В этом режиме измеряют амперметром PA1 предварительное значение тока якоря в режиме холостого хода  $I'_{а0}$ , а амперметром PA2 — величину тока возбуждения  $I_{в,ном}$ , соответствующую номинальной частоте вращения. Результаты измерения заносят в табл. 22.2 и по (22.4) определяют напряжение  $U_0$ , необходимое для выполнения опыта холостого хода, с целью экспериментального определения суммы магнитных и механических потерь (постоянные потери):

$$P_{пост} = P_M + P_{мех}.$$

Используя полученное значение тока возбуждения  $I_{в,ном}$ , по (22.5) определяют электрические потери в цепи возбуждения  $P_{э.в.}$ .

Номинальное значение тока в обмотке якоря (А)

$$I_{ном} = I_{ном} - I_{в,ном}. \quad (22.17)$$

После этого потенциометром RP устанавливают на входе двигателя напряжение  $U_0$ , измеряют ток якоря в режиме холостого хода  $I_{а0}$  и определяют мощность холостого хода в цепи якоря  $P_{а0}$ , представляющую собой сумму магнитных и механических потерь (22.1).

**Коэффициент полезного действия.** Задавшись рядом значений тока нагрузки, например  $I = 0,25; 0,50; 0,75; 1,0I_{ном}$ , определяют соответствующие значения тока в обмотке якоря (А)

$$I_a = I - I_{в,ном}. \quad (22.18)$$

а затем подсчитывают электрические потери: в обмотках якоря  $P_{э.а}$  (22.6) и в щеточном контакте  $P_{э.щ}$  (22.7), а также добавочные потери  $P_{доб}$  (22.8). Результаты вычислений заносят в табл. 22.3 и, определив сумму потерь  $\sum P$  (22.9), потребляемую ( $P_1 = UI$ ) и полезную  $P_2$  (22.11) мощности, вычисляют КПД машины и строят график зависимости КПД  $\eta$  от тока нагрузки  $I$ .

Таблица 22.3

$I, A$	$I_{в}$ А	$P_{э.в}$ Вт	$P_{э.щ}$ Вт	$P_{доб}$ Вт	$\sum P$ , Вт	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$\eta = (P_2/P_1)100$ , %
$0,25I_{ном}$								
$0,50I_{ном}$								
$0,75I_{ном}$								
$1,0I_{ном}$								



## Анализ результатов лабораторной работы

Полученное в лабораторной работе значение КПД машины при номинальной нагрузке следует сравнить с КПД, указанным в паспорте машины. Затем необходимо проанализировать график  $\eta = f(I)$ , сделав заключение о соответствии полученного в лабораторной работе графика типовому, приведенному в учебнике [5]. Определив по графику максимальное значение КПД  $\eta_{\max}$ , следует указать, какому значению тока нагрузки оно соответствует. Для этого значения тока нагрузки следует рассчитать сумму переменных потерь  $P_{\text{э.а}} + P_{\text{э.ш}} + P_{\text{доб}}$  и сравнить ее с суммой постоянных потерь ( $P_{\text{м}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{э.в}}$ ), определив, при каком соотношении этих потерь КПД машины имеет максимальное значение.

### Контрольные вопросы

1. Какие виды потерь имеют место в машинах постоянного тока?
2. Какие потери называют постоянными, а какие — переменными?
3. С какой целью и в какой последовательности проводят опыт холостого хода машины постоянного тока?
4. Какое при этом напряжение следует подвести к двигателю?
5. Почему график  $\eta = f(I)$  выходит не из начала координат?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 23

### Исследование электромашинного усилителя поперечного поля

**Цель работы.** Изучить конструкцию электромашинного усилителя поперечного поля и приобрести практические навыки в сборке схемы и включении ЭМУ, а также опытном исследовании ЭМУ; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах ЭМУ.

### Программа работы

1. Ознакомиться с конструкцией ЭМУ, записать его паспортные данные, а также данные измерительных приборов.
2. Собрать схему по рис. 23.1 и после проверки ее преподавателем выполнить пробный пуск ЭМУ, проверить возможность регулировки и нагрузки.
3. Снять данные и построить внешние характеристики ЭМУ при различной степени компенсации: нормальной, недокомпенсации и перекомпенсации.
4. Определить коэффициент усиления ЭМУ по мощности для различных степеней компенсации; построить графики зависимос-

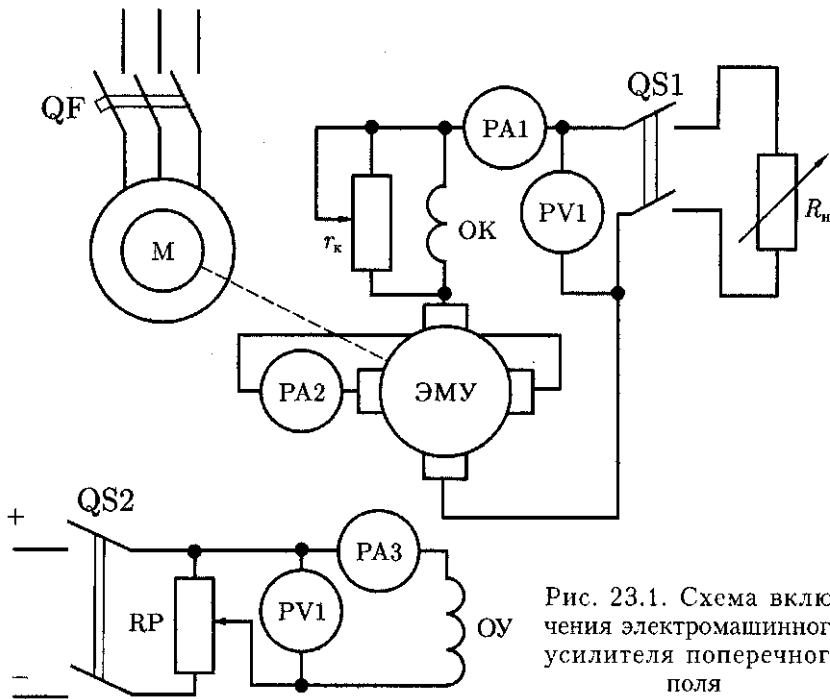


Рис. 23.1. Схема включения электромашинного усилителя поперечного поля

ти коэффициента усиления ЭМУ от тока нагрузки при различных степенях компенсации.

5. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал [7]: электромашинный усилитель поперечного поля — схема соединений, устройство, принцип работы; виды компенсации — нормальная, недокомпенсация, перекомпенсация; влияние степени компенсации на коэффициент усиления по мощности и на устойчивость работы ЭМУ.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатную сетку для построения графиков.

### Порядок выполнения работы

**Схема соединений и пробный пуск усилителя.** Схема, представленная на рис. 23.1, содержит: амперметр PA1 для измерения тока нагрузки  $I_n$ , амперметр PA2 для контроля за изменениями тока в цепи поперечных щеток  $I_q$  и амперметр PA3 для измерения тока в цепи обмотки управления  $I_u$ , вольтметры PV1 и PV2 для измерения

напряжений на выходе ЭМУ  $U_d$  и напряжения управления  $U_y$  соответственно. Подключение нагрузки осуществляется включением рубильника QS1, а подача напряжения управления — рубильника QS2 с регулировкой величины этого напряжения с помощью потенциометра RP. Степень компенсации настраивается реостатом  $r_k$ , шунтирующим компенсационную обмотку ОК усилителя.

Исследуемый ЭМУ имеет однокорпусное исполнение с приводным двигателем. В качестве такого двигателя возможно применение асинхронного трехфазного двигателя, как это показано на схеме (рис. 23.1), либо двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

После сборки схемы и проверки ее преподавателем выполняют пробный пуск ЭМУ. С этой целью включают автомат QF и замыкают рубильник QS2. Затем потенциометром RP устанавливают такое значение тока управления  $I_y$ , при котором напряжение на выходе усилителя имеет номинальное значение. Установив на реостате  $R_n$  наибольшее сопротивление, замыкают QS1 и проверяют возможность нагрузки ЭМУ.

**Внешние характеристики и настройка компенсации.** В процессе работы ЭМУ с нагрузкой рабочий ток в цепи продольных щеток  $I_d$  создает МДС  $F_d$  направленную встречно магнитному потоку управления  $\Phi_y$ , и оказывает на ЭМУ размагничивающее действие. Поэтому напряжение на выходе усилителя с появлением нагрузки значительно понижается. Для компенсации этого нежелательного действия МДС  $F_d$  в ЭМУ применена компенсационная обмотка ОК. Часть тока нагрузки, проходя по этой обмотке, создает МДС  $F_k$ , направленную встречно МДС  $F_d$ . Однако оказывается невозможным так точно рассчитать число витков компенсационной обмотки, чтобы ее МДС полностью компенсировала МДС  $F_d$ . Поэтому обмотку ОК выполняют с таким числом витков, чтобы при нагрузке усилителя МДС  $F_k$  была больше МДС  $F_d$ , т.е. чтобы в усилителе имела место *перекомпенсация*. Параллельно обмотке ОК включают реостат  $r_k$ , изменяя сопротивление которого можно регулировать ток в компенсационной обмотке, а следовательно, изменять величину МДС  $F_k$ . Чтобы настроить *нормальную* компенсацию ЭМУ, поступают следующим образом. Устанавливают на  $r_k$  небольшое сопротивление, затем включают ЭМУ, посредством потенциометра RP возбуждают его до номинального напряжения на выходе  $U_d = U_{дном}$  и подключают нагрузку. При нормальной компенсации ( $F_k = F_d$ ) изменение тока нагрузки  $I_d$  не вызывает изменений тока в цепи поперечных щеток  $I_q$ . Поэтому, подключив нагрузку, следует установить сопротивление реостата  $r_k$ , чтобы при колебаниях тока нагрузки  $I_d$  ток  $I_q$  оставался стабильным.

Настроив нормальную компенсацию, снимают данные для построения внешней характеристики ЭМУ, представляющей собой зависимость напряжения на выходе усилителя  $U_d$  от тока нагрузки  $I_d$

Таблица 23.1

Нормальная компенсация				Недокомпенсация				Перекомпенсация			
$I_d, A$	$U_\phi, B$	$U_y, B$	$I_y, A$	$I_d, A$	$U_\phi, B$	$U_y, B$	$I_y, A$	$I_d, A$	$U_\phi, B$	$U_y, B$	$I_y, A$

при неизменном токе управления  $I_y$ . Установив номинальное напряжение на выходе ЭМУ в режиме холостого хода  $U_{d0} = U_{дном}$ , постепенно увеличивают ток нагрузки  $I_d$  до номинального значения. При этом приблизительно через одинаковые интервалы тока  $I_d$  снимают показания приборов и заносят их в табл. 23.1.

Затем настраивают в ЭМУ недокомпенсацию ( $F_k < F_d$ ). С этой целью уменьшают ток в компенсационной обмотке ОК, т.е. понижают сопротивление реостата  $r_k$  относительно значения, соответствующего нормальной компенсации. Сняв данные для построения внешней характеристики, настраивают в ЭМУ перекомпенсацию ( $F_k > F_d$ ). Для этого движок реостата  $r_k$  смещают относительно его положения, соответствующего нормальной компенсации, в сторону повышения сопротивления. Это вызовет увеличение МДС компенсационной обмотки  $F_k$ . Порядок получения данных для построения внешних характеристик при недокомпенсации и перекомпенсации такой же, как и при нормальной компенсации. Показания приборов заносят в табл. 23.1. Для каждого вида компенсации необходимо снять не менее пяти показаний приборов. По данным таблицы в одних осях координат строят три внешние характеристики усилителя.

Следует помнить, что работа ЭМУ при значительной перекомпенсации становится неустойчивой, так как при этом возможно самовозбуждение усилителя, т.е. самопроизвольный рост напряжения и тока в рабочей цепи при подключенной нагрузке. Поэтому снимать данные внешней характеристики следует лишь при небольшой перекомпенсации.

**Коэффициент усиления по мощности.** Отношение мощности на выходе усилителя  $P_{вых}$  к мощности управления  $P_y$  называют коэффициентом усиления ЭМУ по мощности:

$$k_p = P_{вых}/P_y = (U_d/I_d)/(U_y/I_y). \quad (23.1)$$

Таблица 23.2

Нормальная компенсация		Недокомпенсация		Перекомпенсация	
$I_d, A$	$k_p$	$I_d, A$	$k_p$	$I_d, A$	$k_p$

На величину коэффициента усиления ЭМУ влияют нагрузка и степень компенсации. Для выяснения зависимости  $k_p$  от указанных причин следует воспользоваться данными табл. 23.1 и подсчитать коэффициент усиления для каждого значения тока нагрузки. Результаты вычислений заносят в табл. 23.2 и строят графики зависимости коэффициента усиления  $k_p$  от тока нагрузки  $I_d$  при трех степенях компенсации — нормальной компенсации, недокомпенсации и перекомпенсации.

### **Анализ результатов лабораторной работы**

При анализе результатов лабораторной работы необходимо обратить внимание на форму графиков внешних характеристик ЭМУ при различных степенях компенсации. Сравнивая эти характеристики, нужно указать причины, вызывающие повышение напряжения на выходе усилителя при росте нагрузки в случае перекомпенсации и уменьшения этого напряжения при недокомпенсации. Обратите внимание на прямолинейный вид этих графиков и укажите причину такой их формы. Анализируя графики зависимости коэффициента усиления ЭМУ по мощности от нагрузки и степени компенсации, следует сделать вывод о влиянии этих факторов на коэффициент усиления.

#### **Контрольные вопросы**

1. Почему исследуемый усилитель называют ЭМУ поперечного поля?
2. Будет ли работать ЭМУ поперечного поля, если разомкнуть цепь поперечных щеток?
3. Объясните назначение компенсационной обмотки в ЭМУ поперечного поля.
4. Какие возможны степени компенсации в ЭМУ и какой из них имеет наибольшее практическое применение?
5. Почему при перекомпенсации ЭМУ нарушается его устойчивая работа?
6. Как влияют нагрузка и степень компенсации на коэффициент усиления ЭМУ по мощности?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 24**

### **Исследование исполнительного двигателя постоянного тока**

**Цель работы.** Приобрести практические навыки в сборке схемы и регулировке исполнительного двигателя постоянного тока при якорном способе управления; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах исполнительных двигателей постоянного тока.

## Программа работы

1. Ознакомиться с конструкцией исполнительного двигателя и нагрузочного устройства; записать паспортные данные двигателя и данные измерительных приборов.

2. Собрать схему по рис. 24.1 и после проверки ее преподавателем выполнить пробный пуск двигателя, проверить возможность регулировки двигателя; определить напряжение трогания двигателя при якорном управлении.

3. Снять показания и построить механическую характеристику двигателя при якорном управлении.

4. Снять данные и построить регулировочную характеристику двигателя при якорном управлении.

5. Используя данные двигателя, полученные в п. 3, рассчитать параметры и построить график зависимости полезной мощности двигателя от частоты вращения.

6. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

## Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал [7]: назначение и особенности устройства исполнительных двигателей постоянного тока; якорное и полюсное управления, механические и регулировочные характеристики двигателей, зависимость полезной мощности от частоты вращения.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

## Порядок выполнения работы

**Схема включения и пробный пуск двигателя.** Схема включения исполнительного двигателя (рис. 24.1) содержит два потенциомет-

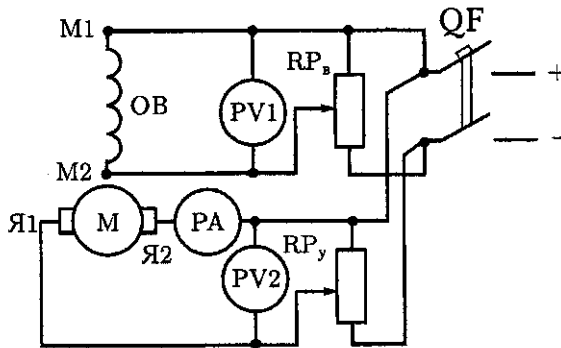


Рис. 24.1. Схема включения исполнительного двигателя постоянного тока

ра: потенциометр  $RP_v$  для создания на обмотке возбуждения номинального напряжения  $U_{в.ном}$  и потенциометр  $RP_y$  для изменения напряжения на обмотке якоря (напряжения управления)  $U_y$  в диапазоне от нуля до номинального значения  $U_{y.ном}$ .

Для измерения указанных напряжений в схеме предусмотрены два вольтметра: вольтметр PV1 для измерения напряжения возбуждения  $U_v$  и вольтметр PV2 для измерения напряжения управления  $U_y$ . Кроме того, в схеме использован амперметр PA для контроля за током в цепи управления  $I_y$ , который не должен превышать номинального значения  $I_{y.ном}$ .

Тип тормозного устройства определяется в основном мощностью исследуемого двигателя: при мощности до 20 Вт целесообразно использование ленточного тормоза маятникового типа, а при большой мощности — электромагнитного тормоза (см. В.4).

Для измерения частоты вращения желательнее использовать строботажметр, но при мощности более 100 Вт возможно также применение тахометра часового типа или тахогенератора.

Собирают схему по рис. 24.1 и после проверки ее преподавателем выполняют пробный пуск двигателя. С этой целью движки потенциометров  $RP_v$  и  $RP_y$  ставят в положения, соответствующие минимальным напряжениям, и включают автомат QF. Затем потенциометром  $RP_v$  устанавливают в цепи обмотки возбуждения номинальное напряжение  $U_{в.ном}$ . Если при этом якорь двигателя остается неподвижным, то это свидетельствует об отсутствии в двигателе *самохода*, т. е. о соблюдении одного из основных требований, предъявляемых к исполнительным двигателям (см. лабораторную работу № 10). Затем постепенно повышают напряжение управления  $U_y$  до номинального значения и наблюдают за нарастающей частотой вращения двигателя. После этого напряжение  $U_y$  уменьшают до нуля, после чего очень медленно его повышают до значения, при котором начинается вращение якоря. Измеренное при этом напряжение управления представляет собой *напряжение трогания*  $U_{y.тр}$ . Напряжение возбуждения, как и при всех последующих опытах, должно сохраняться номинальным. При выполнении этого опыта по определению напряжения трогания в качестве вольтметра PV2 следует использовать вольтметр с небольшим пределом измерения — не более  $0,20 U_{y.ном}$ . Для получения более точного результата опыт повторяют три раза и получают три значения напряжения трогания  $U_{y.тр}$ , а затем находят среднее значение напряжения трогания (В):

$$U_{y.тр.ср} = (U_{y.тр1} + U_{y.тр2} + U_{y.тр3})/3. \quad (24.1)$$

**Механическая характеристика** исполнительного двигателя представляет собой зависимость момента на валу от частоты вращения при неизменной величине сигнала, например при номинальном напряжении сигнала. Данные для построения механической характеристики получают следующим образом. Потенциометрами  $RP_v$

Таблица 24.1

Номер измерения	$M_2$ , Н·м	$n$ , об/мин	$m$	$\nu$

и  $RP_y$  устанавливают номинальные напряжения возбуждения  $U_{в.ном}$  и управления  $U_{у.ном}$  и с помощью тормозного устройства затормаживают якорь двигателя. При этом измеряют начальный пусковой момент  $M_n$  при  $n = 0$ . Постепенно уменьшая нагрузку на вал двигателя вплоть до холостого хода ( $M_2 = 0$ ), через приблизительно одинаковые интервалы этого момента измеряют частоту вращения двигателя. Делают не менее пяти замеров, а результаты заносят в табл. 24.1. Полученные значения момента и частоты вращения пересчитывают в относительные значения:

$$m = M_2/M_n; \nu = n/n_0. \quad (24.2)$$

В этих выражениях начальный пусковой момент  $M_n$  (при  $n = 0$ ) и частота вращения в режиме холостого хода  $n_0$  (при  $M_2 = 0$ ) приняты за базовые величины.

Полученные относительные значения момента  $m$  и частоты вращения  $\nu$ , соответствующие коэффициенту сигнала  $\alpha = U_y/U_{в.ном} = U_{у.ном}/U_{в.ном} = 1$ , заносят в табл. 24.1 и строят механическую характеристику исполнительного двигателя постоянного тока  $m = f(\nu)$ . Затем определяют нелинейность этой характеристики (см. рис. 10.2, а) (%)

$$\Delta m = (\overline{DB}/\overline{AB})100. \quad (24.3)$$

**Регулировочная характеристика** исполнительного двигателя представляет собой зависимость частоты вращения от напряжения управления или же, переходя к относительным величинам, зависимость относительной частоты вращения  $\nu$  от коэффициента сигнала  $\alpha = U_y/U_{в.ном}$ . Данные для построения регулировочной характеристики снимают при неизменной нагрузке на валу двигателя. В данной работе эти данные снимают в режиме холостого хода ( $M_2 = 0$ ).

Поставив потенциометр  $RP_y$  в положение, соответствующее  $U_y = 0$ , а потенциометр  $RP_v$  в положение, соответствующее  $U_v = U_{в.ном}$ , постепенно повышают напряжение управления до номинального значения. При этом через приблизительно одинаковые интервалы

Таблица 24.2

Номер измерения	$U_y$ , В	$n$ , об/мин	$\alpha$	$\nu$



Таблица 24.3

$\nu$					
$P_2, \text{Вт}$					

этого напряжения измеряют частоту вращения двигателя. Всего делают не менее пяти замеров и заносят показания в табл. 24.2, а затем рассчитывают относительные значения измеренных величин: напряжение управления — коэффициент сигнала

$$\alpha = U_y / U_{\text{в.ном}} \quad (24.4)$$

и относительную частоту вращения  $\nu$  (24.2), где за базовую величину  $n_0$ , принимают частоту вращения в режиме холостого хода при  $\alpha = 1$ , т.е. при  $U_y = U_{\text{у.ном}}$ .

Результаты вычислений заносят в табл. 24.2, строят регулировочную характеристику исполнительного двигателя постоянного тока при якорном управлении  $\nu = f(\alpha)$  и определяют ее нелинейность (см. рис. 10.2, б) (%)

$$\Delta\nu = (\overline{DB} / \overline{AB})100. \quad (24.5)$$

**Зависимость полезной механической мощности двигателя от частоты вращения.** Используя данные, приведенные в табл. 24.1, определяют полезную механическую мощность двигателя (Вт):

$$P_2 = 0,105 M_2 n. \quad (24.6)$$

Результаты вычислений заносят в табл. 24.3.

По результатам вычислений строят графики  $P_2 = f(\nu)$  при якорном способе управления исполнительным двигателем постоянного тока.

### Анализ результатов лабораторной работы

При анализе результатов лабораторной работы дают заключение о форме полученных графиков механической и регулировочной характеристик, которые сравнивают с аналогичными характеристиками асинхронного исполнительного двигателя при амплитудном и амплитудно-фазовом способах управления, полученными при выполнении лабораторной работы № 10.

Сравнивают также нелинейности механических и регулировочных характеристик. Весьма важный параметр исполнительного двигателя — напряжение трогания. Для того чтобы можно было сравнить напряжение трогания исполнительного двигателя постоянного тока с напряжениями трогания асинхронного исполнительного двигателя при амплитудном и амплитудно-фазовом способах управления, необходимо выразить эти напряжения в % от номинального значения напряжения управления:

$$\eta_{y, \text{тр}} = (U_{y, \text{тр}} / U_{y, \text{ном}}) 100. \quad (24.7)$$

Делая вывод о достоинствах и недостатках исполнительных двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей, необходимо иметь в виду специфические свойства, определяемые их конструкцией, например недостатки, обусловленные наличием коллектора в исполнительных двигателях постоянного тока.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие способы управления применяют в исполнительных двигателях постоянного тока? Укажите достоинства и недостатки этих способов.
2. Каковы особенности конструкции исполнительных двигателей постоянного тока по сравнению с обычными коллекторными двигателями постоянного тока?
3. Что такое механическая и регулировочная характеристики исполнительного двигателя и при каких условиях их снимают?
4. Какие значения принимаются за базовые при расчете относительных величин момента, частоты вращения и коэффициента сигнала?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 25**

### **Исследование сельсинов в индикаторном режиме**

**Цель работы.** Изучить конструкцию сельсинов и приобрести практические навыки в сборке схемы и включении сельсинов, а также в их опытном исследовании для определения точности и основных параметров; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах сельсинов в индикаторном режиме.

### **Программа работы**

1. Ознакомиться с конструкцией сельсинов, записать их паспортные данные.
2. Собрать схему по рис. 25.1 и после проверки ее преподавателем удостовериться в работоспособности индикаторной системы.
3. Снять данные и построить график углов рассогласования; определить класс точности сельсина.
4. Определить удельный синхронизирующий момент сельсина-приемника.
5. Определить время успокоения сельсина-приемника.
6. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

### **Подготовка к работе**

1. Повторить теоретический материал [7]: назначение и устройство сельсинов; принцип работы сельсинов в индикаторной системе.

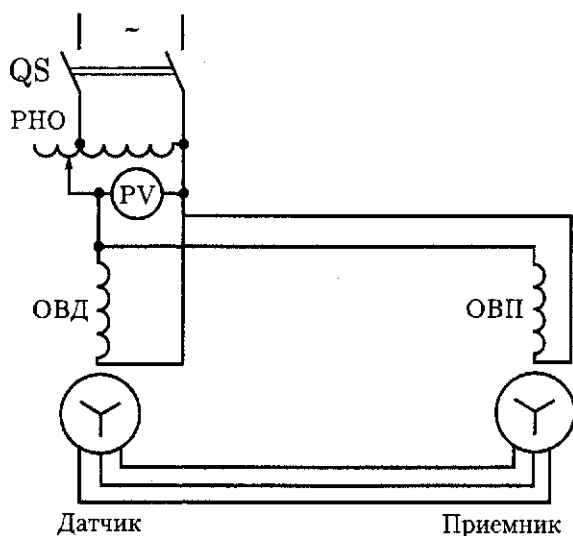


Рис. 25.1. Индикаторная схема включения однофазных сельсинов

ме передачи; понятие об угле рассогласования и классах точности сельсинов; синхронизирующий момент и удельный синхронизирующий момент сельсина-приемника.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатную сетку для построения графика.

### Порядок выполнения работы

**Лабораторная установка** содержит два одинаковых сельсина — сельсин-датчик и сельсин-приемник (рис. 25.1). Обмотки возбуждения этих сельсинов ОВД и ОВП включены в сеть переменного тока через однофазный регулятор напряжения РНО. Это позволяет поддерживать на обмотках возбуждения номинальное напряжение. Для возможности контроля за положением роторов сельсинов панель, на которой закреплены сельсины, имеет две шкалы с делениями (от 0 до  $360^\circ$ ), а на осях сельсинов укреплены стрелки.

Сельсин-датчик снабжен устройством для закрепления оси в нулевом положении стрелки. На оси сельсина-приемника закреплен шкив, к которому прикреплена нить с кольцом на свободном конце для подвешивания груза. При сборке схемы необходимо внимательно проследить за тем, чтобы каждый из соединительных проводов был присоединен к одноименным зажимам датчика и приемника.

После сборки схемы и проверки ее преподавателем включают рубильник QS и с помощью регулятора РНО устанавливают в цепи обмоток возбуждения номинальное напряжение. Затем, поворачивая ротор сельсина-датчика, наблюдают за поворотом ротора сель-

Таблица 25.1

По часовой стрелке, град			Против часовой стрелки, град		
$\alpha_d$	$\alpha_p$	$\theta$	$\alpha_d$	$\alpha_p$	$\theta$

сина-приемника. Если ротор сельсина-приемника поворачивается в сторону, противоположную повороту ротора сельсина-датчика, то это свидетельствует о присоединении некоторых соединительных проводов к разноименным зажимам.

**График углов рассогласования** представляет собой зависимость углов рассогласования ( $\theta = \alpha_d - \alpha_p$ ) от угла поворота ротора сельсина-датчика  $\alpha_d$  при номинальном напряжении на обмотках возбуждения и отсутствии какой-либо нагрузки на шкиве сельсина-приемника  $\alpha_p$ . Прежде чем приступить к выполнению опыта, проверяют совпадение нулевых положений стрелок на шкалах сельсина-датчика и сельсина-приемника. Если требуемого совпадения нет, то его следует добиться поворотом корпуса сельсина-приемника. На сельсине-датчике задаются углы поворота через каждые  $10^\circ$  (полный оборот  $360^\circ$ ). Разность между показаниями углов поворота на датчике  $\alpha_d$  и приемнике  $\alpha_p$ , выраженная в градусах, и представляет собой угол рассогласования  $\theta$ .

Значения углов заносят в табл. 25.1, а затем строят график углов рассогласования, примерный вид которого показан на рис. 25.2. Гра-

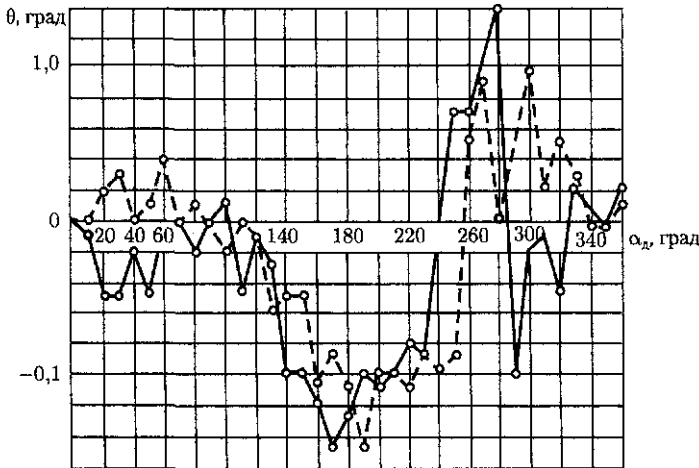


Рис. 25.2. Графики углов рассогласования сельсина-приемника в индикаторном режиме при повороте ротора по часовой (—) и против часовой (---) стрелки

фик углов рассогласования снимают дважды: при повороте ротора сельсина-датчика по часовой стрелке и против часовой стрелки.

Точность сельсина определяется как полусумма абсолютных максимальных значений положительного  $\theta_{\max(+)}$  и отрицательного  $\theta_{\max(-)}$  углов рассогласования:

$$\Delta = 0,5(\theta_{\max(+)} + \theta_{\max(-)}). \quad (25.1)$$

Сельсины в индикаторной системе разделяют на три класса точности (град):

1-й класс .....	$\Delta = 0 \div 0,75$
2-й класс .....	$\Delta = 0,76 \div 1,50$
3-й класс .....	$\Delta = 1,51 \div 2,50$

Удельный синхронизирующий момент  $M_{п.уд}$  сельсина-приемника представляет собой синхронизирующий момент  $M_{п}$ , приходящийся на один градус угла рассогласования ( $H \cdot \text{см}/\text{град}$ ):

$$M_{п.уд} = M_{п}/\theta. \quad (25.2)$$

Для определения удельного синхронизирующего момента необходимо закрепить ось сельсина-датчика в нулевом положении, подать напряжение на обмотки возбуждения (включить QS1), согласовать ротор приемника с ротором датчика, т. е. выставить его в нулевое положение, и подвесить груз к нити, закрепленной на шкиве сельсина-приемника. При этом ротор приемника выйдет из согласованного положения и его стрелка отклонится на угол рассогласования  $\theta$ . Удельный синхронизирующий момент сельсина-приемника определяют по (25.2), при этом синхронизирующий момент ( $H \cdot \text{см}$ )

$$M_{п} = 0,5GD_{ш}, \quad (25.3)$$

где  $G$  — вес груза, вызвавшего отклонение ротора приемника на угол  $\theta$ , Н;  $D_{ш}$  — диаметр шкива на оси приемника, см.

Для более точного определения удельного синхронизирующего момента измеряют угол рассогласования четыре раза — два раза при отклонении ротора приемника по часовой стрелке и два — против часовой стрелки. При этом угол рассогласования определяют как среднее арифметическое (град)

$$\theta_{ср} = (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4)/4. \quad (25.4)$$

Результаты измерений и вычислений заносят в табл. 25.2.

**Время успокоения** сельсина-приемника определяют следующим образом. Роторы сельсинов устанавливают так, чтобы в согласованном положении нулю на шкале датчика соответствовал нуль на шкале приемника. Ротор датчика закрепляют в нулевом положении и выключают рубильник QS. Затем стрелку приемника вместе

Таблица 25.2

Угол рассогласования при повороте ротора, град		$\theta_{\text{ср}}$ , град	G, Н	$D_{\text{ш}}$ , см	$M_{\text{т}}$ , Н·см
по часовой стрелке	против часовой стрелки				
$\theta_1 =$	$\theta_2 =$				
$\theta_3 =$	$\theta_4 =$				

с его ротором отклоняют на угол  $179$  или  $181^\circ$  и включают рубильник QS, подав номинальное напряжение на обмотки возбуждения сельсинов. Одновременно включают секундомер и измеряют время, в течение которого ротор приемника успокаивается, приходя в согласованное с ротором датчика положение. Это и есть время успокоения.

Для получения более точного результата опыт повторяют три раза, а затем определяют среднее значение времени успокоения ( $\epsilon$ )

$$T_{\text{усп.ср}} = (T_{\text{усп1}} + T_{\text{усп2}} + T_{\text{усп3}})/3. \quad (25.5)$$

### Анализ результатов лабораторной работы

В первую очередь следует внимательно проанализировать графики углов рассогласования сельсина-приемника (см. рис. 25.2). При этом необходимо помнить, что различные значения углов рассогласования при повороте ротора сельсина-датчика на  $360^\circ$  обусловлены рядом причин, наиболее существенные из которых магнитная и электрическая асимметрия и момент трения. Момент трения наиболее сильно проявляется в контактных сельсинах за счет трения щеток (пружинок) о контактные кольца.

Несовпадение графиков углов рассогласования при повороте ротора по часовой стрелке и против часовой стрелки обусловлено влиянием момента трения в сельсине-приемнике, значения которого при разных направлениях вращения ротора неодинаковы.

Электрическая асимметрия вызвана неравенством электрических сопротивлений фаз обмотки синхронизации, а также неравенством переходных сопротивлений на контактных кольцах (в контактных сельсинах). Магнитная асимметрия является следствием неравенства магнитных сопротивлений пакета стали статора или ротора в различных радиальных направлениях. Причиной магнитной асимметрии может оказаться и неравномерный воздушный зазор.

В заключении к лабораторной работе следует указать, к какому классу точности относится исследуемый сельсин-приемник, его удельный синхронизирующий момент и время успокоения.

### **Контрольные вопросы**

1. Что представляет собой индикаторная система передачи угла поворота?
2. Каков принцип работы сельсинов в индикаторной системе передачи?
3. Каким образом снимают данные для построения графиков углов рас-  
согласования сельсина-приемника?
4. Что такое удельный синхронизирующий момент сельсина-приемника  
и как его определить экспериментально?
5. Перечислите факторы, влияющие на точность сельсинов.
6. С какой целью сельсин-приемник снабжают демпфером?

# Раздел второй

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

### Глава 5

## ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 26

#### Определение момента инерции и махового момента электрического привода методом свободного выбега

**Цель работы.** Определить момент инерции и маховой момент электропривода, приобрести практические навыки в опытном определении момента инерции и махового момента электропривода; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям.

#### Программа работы

1. Ознакомиться с устройством лабораторной установки; записать паспортные данные электрических машин и измерительных приборов.
2. Собрать схему по рис. 26.1 и после проверки ее преподавателем выполнить опыт холостого хода.

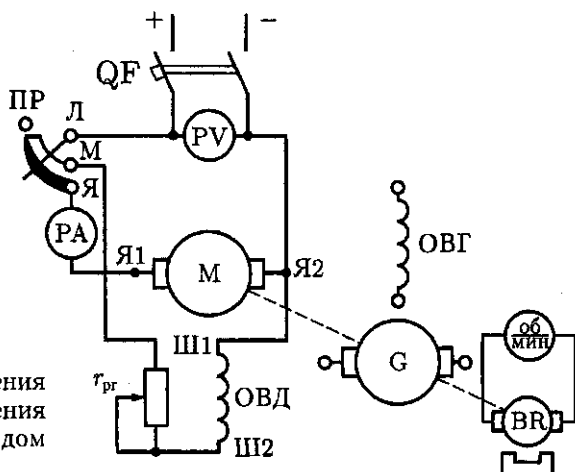


Рис. 26.1. Схема включения установки для определения момента инерции методом свободного выбега



3. Снять данные и построить график «Кривая выбега» агрегата  $n = f(t)$ .

4. Используя результаты опытов (п. 2 и 3), определить общий момент инерции и маховой момент агрегата.

5. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал: статический и динамический моменты инерции; основное уравнение движения электропривода; момент инерции и маховой момент электропривода; приведение момента инерции и махового момента электропривода к частоте вращения вала двигателя.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатную сетку для построения графика.

### Основные понятия

При установившемся режиме работы электропривода, т.е. при постоянной его частоте вращения, мощность, развиваемая электродвигателем, расходуется на преодоление лишь только статической нагрузки. Если же в электроприводе наступил переходный режим и он стал работать с переменной частотой вращения, то мощность электродвигателя расходуется не только на статическую, но и динамическую нагрузку.

Статическая нагрузка обусловлена двумя факторами: моментом статического сопротивления на валу рабочего механизма и силами сопротивления в передачах, соединяющих вал электродвигателя с выходным валом рабочего механизма (рабочей машины). Динамическая нагрузка электропривода определяется динамическим моментом  $M_j$ , обусловленным изменением скорости движения всех элементов системы электропривода.

Уравнение движения электропривода устанавливает связь между моментами, действующими на вал электродвигателя: моментом  $M_2$ , развиваемым электродвигателем на его валу, моментом статической нагрузки  $M_c$  и динамическим моментом  $M_j$ :

$$M_2 = M_c \pm M_j, \quad (26.1)$$

Знак плюс в этом выражении соответствует процессу ускорения (нарастанию скорости) электропривода, а знак минус — замедлению (убыванию скорости). Момент статической нагрузки, соответствующий установившемуся режиму работы электропривода (неизменной частоте вращения), можно представить в виде суммы моментов — момента статического сопротивления механизма  $M_{c, м}$ , обусловленного полезной работой механизма (например, работой по подъему груза), и момента трения  $M_{тр}$ , вызванного силами трения в механизме:

$$M_c = M_{c.m} + M_{тр}. \quad (26.2)$$

Момент трения можно учесть введением в уравнение (26.2) значений КПД рабочего механизма  $\eta_{р.м}$  и КПД передаточного устройства (редуктора)  $\eta_{ред}$ . В этом случае момент статического сопротивления механизма ( $\text{Н} \cdot \text{м}$ )

$$M_c = M_{c.m}/\eta, \quad (26.3)$$

где

$$\eta = \eta_{р.м}\eta_{ред}.$$

Динамический момент  $M_j$  возникает под влиянием ускорений при изменении скорости движения. Для электропривода с вращательным движением динамический момент ( $\text{Н} \cdot \text{м}$ )

$$M_j = J(d\omega/dt), \quad (26.4)$$

где  $J$  — момент инерции вращающегося тела относительно оси вращения,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $\omega$  — угловая скорость вращения этого тела,  $\text{рад/с}$ .

Используя выражения (26.3) и (26.4), получим уравнение движения электропривода:

$$M_2 = M_c + M_j = (M_{c.m}/\eta) + J(d\omega/dt). \quad (26.5)$$

Обычно приводной двигатель соединяется с рабочим механизмом промежуточным передаточным устройством, изменяющим частоту вращения и передаваемый момент. Таким устройством чаще всего является редуктор с КПД  $\eta_{ред}$  и передаточным отношением  $i = \omega_d/\omega_{мех}$ , где  $\omega_d$  и  $\omega_{мех}$  — угловые скорости вращения валов двигателя и рабочего механизма соответственно.

Для того чтобы избежать трудоемкого решения нескольких уравнений движения для различных элементов электропривода с разными угловыми скоростями движения, все моменты сопротивления и моменты инерции различных элементов, образующих систему электропривода, приводят к какой-либо одной скорости движения — обычно к угловой скорости вращения вала электродвигателя. Другими словами, реальная система электропривода, элементы которой вращаются с разными угловыми скоростями, заменяется упрощенной системой, у которой вся движущаяся масса сосредоточена на одном валу и вращается с угловой скоростью  $\omega_d$ . В этом случае приведенное значение статического момента сопротивления механизма имеет вид

$$M'_{c.m} = M_{c.m}/(\eta i), \quad (26.6)$$

где  $i = \omega_d/\omega_{мех}$  — передаточное отношение редуктора.

Общий момент инерции системы электропривода определяется суммой моментов инерции: момента инерции  $J_d$  вращающихся частей электродвигателя и расположенных на его валу устройств (например, соединительной муфты) и момента инерции  $J'$  приведен-

ного к угловой скорости вала двигателя передающего устройства (редуктора) и рабочего механизма:

$$J_{\text{общ}} = J_{\text{д}} + J'. \quad (26.7)$$

Приведенный момент инерции  $J'$  определяется суммой приведенных значений моментов инерции всех элементов электропривода, вращающихся с угловой скоростью, отличающейся от угловой скорости вращения вала двигателя  $\omega_{\text{д}}$ :

$$J' = J_1 \frac{1}{i_1^2} + J_2 \frac{1}{i_1^2 i_2^2} + \dots + J_n \frac{1}{i_1^2 i_2^2 \dots i_n^2}, \quad (26.8)$$

где  $i_1, i_2, \dots, i_n$  — передаточные отношения на разных ступенях угловых скоростей вращения.

Мерой инерции вращающихся тел является также маховой момент, связанный с моментом инерции  $J$  зависимостью

$$GD^2 = 4gJ, \quad (26.9)$$

где  $G$  — сила тяжести вращающегося тела, Н;  $D$  — диаметр вращения, м;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения (является коэффициентом, связывающим единицы измерения — ньютоны и килограммы:  $1 \text{ кг} = 9,81 \text{ Н}$ );  $J$  — момент инерции,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ .

В каталогах на электродвигатели маховой момент ротора иногда указан в устаревших единицах  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ . В этом случае

$$GD^2 = 4J.$$

В данной работе рассматривается один из методов экспериментального определения общего момента инерции и общего махового момента системы электропривода, называемый *методом свободного выбега* (самоторможения). Выбег — это неустановившееся движение (по инерции) подвижных частей системы электропривода после отключения двигателя за счет кинетической энергии этих частей.

Сущность метода выбега состоит в следующем. Исследуемый агрегат, включающий двигатель и механически соединенные с ним элементы, разгоняется до некоторой установившейся частоты вращения в режиме холостого хода  $\omega_{\text{х0}}$ . После этого двигатель отключают от сети и наступает процесс самопроизвольного торможения, т. е. торможения исключительно за счет внутренних сил трения (трения в подшипниках, трения щеток о коллектор или контактные кольца двигателя, трение в других элементах электропривода). На преодоление этих сил трения затрачивается кинетическая энергия (Дж), запасенная во вращающихся частях агрегата:

$$A = J_{\text{общ}} \omega_{\text{д0}}^2 / 2. \quad (26.10)$$

С другой стороны, эта энергия может быть определена как произведение мощности, затраченной на приведение во вращение системы электропривода в режиме холостого хода  $P_{\text{вр.0}}$  на время  $t_0$ :

$$A = P_{вр.0} t_0. \quad (26.11)$$

Приравняв (26.10) к (26.11), получим выражение общего момента инерции (кг·м<sup>2</sup>)

$$J_{общ} = 2P_{вр.0} t_0 / \omega_{д0}^2. \quad (26.12)$$

Переходя к частоте вращения двигателя в режиме холостого хода  $n_{д0}$  и учитывая, что  $\omega = 0,105n$ , получим

$$J_{общ} = 182P_{вр.0} t_0 / n_{д0}^2. \quad (26.13)$$

По найденному значению общего момента инерции вращающихся частей системы электропривода  $J_{общ}$ , воспользовавшись зависимостью (26.9), определяют маховой момент агрегата (Н·м<sup>2</sup>)

$$GD^2 = 4gJ_{общ} = 7142P_{вр.0} t_0 / n_{д0}^2. \quad (26.14)$$

Значения  $P_{вр.0}$  и  $t_0$ , вошедшие в (26.13) и (26.14), определяют экспериментально, выполнив опыт холостого хода, опыт свободного выбега и построив кривую выбега  $n_{д0} = f(t_0)$  (см. рис. 26.2).

### Лабораторная установка

Лабораторная установка представляет собой агрегат, состоящий из двух электрических машин постоянного тока, одна из которых — двигатель М (см. рис. 26.1) параллельного возбуждения. Этот электродвигатель включается в сеть через автомат QF и пусковой реостат ПР. В схему включены: вольтметр PV для контроля над напряжением сети и амперметр PA для измерения тока в цепи якоря  $I_a$ . Произведение показаний этих приборов определяет мощность (Вт), потребляемую двигателем в цепи якоря  $P_a = U_c I_a$ .

Наиболее внимательно в данной работе следует отнестись к измерениям частоты вращения агрегата, так как точность измерений этого параметра во многом определяет результат эксперимента. Наилучшие результаты в рассматриваемой работе дает применение тахогенератора BR, так как в этом случае появляется возможность непрерывно контролировать частоту вращения агрегата по показанию прибора «об/мин». Время следует измерять секундомером.

Что же касается применения второй машины G в установке, то она используется лишь для увеличения момента инерции агрегата и могла бы быть заменена маховиком. Дело в том, что увеличение момента инерции ведет к росту времени выбега, что способствует уменьшению возможных ошибок при измерениях времени и частоты вращения для получения данных графика «кривая выбега».

### Порядок выполнения работы

**Опыт холостого хода.** Двигатель включают в сеть при номинальном напряжении сети. Регулировочным реостатом  $r_{пр}$  устанавлива-

Таблица 26.1

$U$ , В	$I_{a0}$ , А	$n_{д0}$ , об/мин	$P_0$ , Вт	$P_{э.а}$ , Вт	$P_{э.щ}$ , Вт	$P_{вр.ш}$ , Вт

ют частоту вращения  $n_{д0} = 1,2n_{ном}$ . После того как частота вращения агрегата достигнет установившегося значения, снимают показания приборов и заносят их в табл. 26.1. Необходимые вычисления выполняют по формулам:

мощность в цепи якоря двигателя (Вт)

$$P_0 = UI_{a0}; \quad (26.15)$$

электрические потери в обмотках цепи якоря двигателя (Вт)

$$P_{э.а} = I_{a0}^2 \sum r, \quad (26.16)$$

где

$$\sum r = r_a + r_{д.п} + \dots \quad (26.17)$$

— сумма сопротивлений обмоток в цепи якоря двигателя при температуре окружающей среды, если опыт проводился на «холодном» двигателе, Ом;

электрические потери в щеточном контакте (Вт)

$$P_{э.щ} = I_{a0} \Delta U_{щ}, \quad (26.18)$$

где  $\Delta U_{щ}$  — падение напряжения в контакте щеток (принимают  $\Delta U_{щ} = 2$  В).

Все полученные значения величин заносят в табл. 26.1 и определяют мощность, затраченную на вращение агрегата в режиме холостого хода (Вт)

$$P_{вр0} = P_0 - (P_{э.а} + P_{э.щ}). \quad (26.19)$$

**График «кривая выбега».** После снятия показаний приборов при опыте холостого хода отключают двигатель от сети и одновременно включают секундомер. В процессе выбега агрегата, т.е. его вращения по инерции, необходимо 6—8 раз измерить частоту вращения  $n_{д0}$  с одновременным фиксированием времени каждого замера по секундомеру. Первый замер частоты вращения делают в момент отключения двигателя, т.е. в момент времени  $t = 0$ , а последний — в момент полной остановки агрегата, т.е. при  $n_{д0} = 0$ . Особенно внимательно следует относиться к измерениям при первых трех замерах, следующих непосредственно за отключением двигателя, так как

Таблица 26.2

$t$ , с					
$n$ , об/мин					

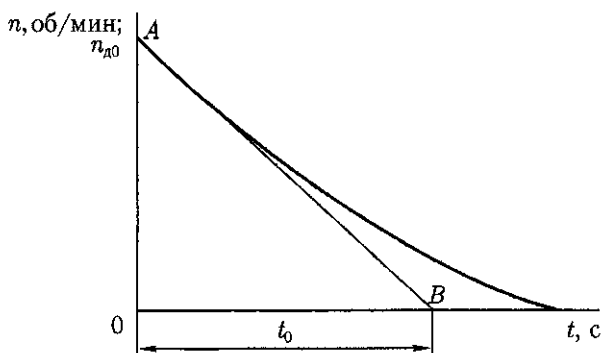


Рис. 26.2. Кривая выбега  $n = f(t)$

эти замеры в значительной степени влияют на точность результатов эксперимента. Показания приборов заносят в табл. 26.2.

Затем строят график «кривая выбега» (рис. 26.2).

Таблица 26.3

$P_{вр0}$ , Вт	$n_{д0}$ , об/мин	$t_0$ , с	$J_{общ}$ , кг·м <sup>2</sup>	$GD^2$ , Н·м <sup>2</sup>

Чтобы воспользоваться выражением (26.13) для определения общего момента инерции агрегата, необходимо определить постоянную времени выбега  $t_0$ . С этой целью на графике «кривая выбега» проводят касательную к начальной части кривой в точке  $A$  (см. рис. 26.2) до пересечения с осью абсцисс в точке  $B$ . Полученный таким образом отрезок  $OB$  на оси абсцисс и определит время  $t_0$ , которое заносят в табл. 26.3. В эту же таблицу записывают значения  $P_{вр0}$  и  $n_{д0}$  из табл. 26.1, а затем определяют общий момент инерции агрегата  $J_{общ}$  (26.13) и маховой момент  $GD^2$  (26.14).

### Анализ результатов лабораторной работы

Анализируя результаты лабораторной работы, необходимо иметь в виду следующее. При расчете момента инерции в выражении (26.13) предусмотрена подстановка значения мощности, затраченной исключительно на приведение во вращение агрегата с частотой вращения  $n_{д0}$ , т. е. мощности механических потерь  $P_{мех}$ . Что же касается значения мощности  $P_{вр0}$ , определяемой по (26.19), то она помимо мощности механических потерь включает в себя и мощность магнитных потерь (см. лабораторную работу № 22)  $P_M$ , т. е.

$$P_{вр0} = P_M + P_{мех}.$$

Следует заметить, что исследованию подвергается агрегат, состоящий из двух электрических машин, поэтому магнитные потери происходят лишь в одной из них (двигателе), а механические потери — одновременно в двух машинах. По этой причине доля магнитных потерь в общей сумме потерь

$$P_{вр0} = P_{м} + P_{мех.д} + P_{мех.г}$$

становится малозначительной. Если же учесть, что в реальных условиях система электропривода содержит помимо рабочей машины еще и передающее устройство (редуктор), в котором также имеют место механические потери, то ошибка метода свободного выбега становится практически незаметной.

### **Контрольные вопросы**

1. На какие свойства электропривода влияет величина момента инерции и махового момента?
2. Что такое маховой момент и какова его зависимость от момента инерции системы электропривода?
3. На чем основан метод свободного выбега для определения момента инерции системы электропривода?
4. Как изменится время выбега агрегата, если на валу двигателя установить маховик?
5. Что представляет собой кривая выбега и каков порядок снятия данных для ее построения?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 27**

### **Исследование механических характеристик двигателя постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения**

**Цель работы.** Приобрести практические навыки в выполнении опытов по снятию данных и построении механических характеристик двигателя постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения для различных режимов работы; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о механических характеристиках этого двигателя.

### **Программа работы**

1. Ознакомиться с устройством лабораторной установки, записать паспортные данные электрических машин и измерительных приборов.
2. Подготовить лабораторную установку к снятию данных механических характеристик.

3. Снять данные для построения механических характеристик двигателя в генераторном тормозном (рекуперативном), двигательном (основном) режимах и тормозном режиме противовключения: а) при  $r_{доб} = 0$ ; б) при  $r_{доб} = r_{доб1}$ ; в) при  $r_{доб} = r_{доб2}$ .

4. Снять данные для построения механических характеристик двигателя в режиме динамического торможения: а) при  $r_{торм1}$ ; б) при  $r_{торм2}$ .

5. Построить механические характеристики двигателя для всех режимов его работы.

6. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал: режимы работы двигателей постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения — двигательный (основной), генераторный тормозной с отдачей энергии в сеть (рекуперативный), тормозной противовключением и тормозной динамической; механические характеристики двигателя при этих режимах.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

### Основные понятия

Частота вращения двигателя постоянного тока

$$n = \frac{U - I_a R}{c_e \Phi} = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{I_a R}{c_e \Phi}. \quad (27.1)$$

Если в этом выражении ток якоря  $I_a$  выразить через электромагнитный момент

$$I_a = M / (c_m \Phi),$$

то получим уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока  $n = f(M)$ , представляющее собой зависимость частоты вращения  $n$  от момента  $M$  при неизменном токе возбуждения и номинальном подведенном напряжении

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{MR}{c_e c_m \Phi^2}, \quad (27.2)$$

где  $c_e = pN / (60a)$ ;  $c_m = pN / (60\pi a)$  — постоянные коэффициенты;  $\Phi$  — основной магнитный поток (Вб);

$$R = \sum r + r_{доб} \quad (27.3)$$

— электрическое сопротивление цепи якоря двигателя, Ом;  $\sum r$  — сопротивление обмоток в цепи якоря, приведенное к рабочей температуре;  $r_{доб}$  — сопротивление добавочного резистора, включенного последовательно в цепь якоря двигателя.



В режиме идеального холостого хода ( $n = n_0$ ) ток в цепи якоря  $I_a = 0$ , а следовательно, и электромагнитный момент  $M = 0$ , поэтому частота вращения в режиме идеального холостого хода (об/мин)

$$n = U / (c_e \Phi). \quad (27.4)$$

Таким образом, уравнения механических характеристик можно привести к виду

$$n = n_0 - \Delta n, \quad (27.5)$$

где  $\Delta n$  — изменение частоты вращения, вызванное нагрузкой двигателя.

Зависимость  $\Delta n$  от тока нагрузки определяется выражением

$$\Delta n = -[I_a R / (c_e \Phi)], \quad (27.6)$$

а зависимость  $\Delta n$  от момента нагрузки имеет вид

$$\Delta n = -[MR / (c_e c_m \Phi^2)]. \quad (27.7)$$

Таким образом, как это следует из (27.5), механические характеристики двигателя параллельного (независимого) возбуждения представляют собой прямые линии (рис. 27.1). Выражения (27.6) и (27.7) показывают, что изменение частоты вращения двигателя, обусловленное изменением его нагрузки, пропорционально электрическому сопротивлению цепи якоря  $R = \sum r + r_{\text{доб}}$ . Поэтому наименьшему сопротивлению цепи якоря  $R = \sum r$  соответствует наименьшее изменение частоты вращения  $\Delta n$ . В этом случае механическая характеристика двигателя является наиболее жесткой.

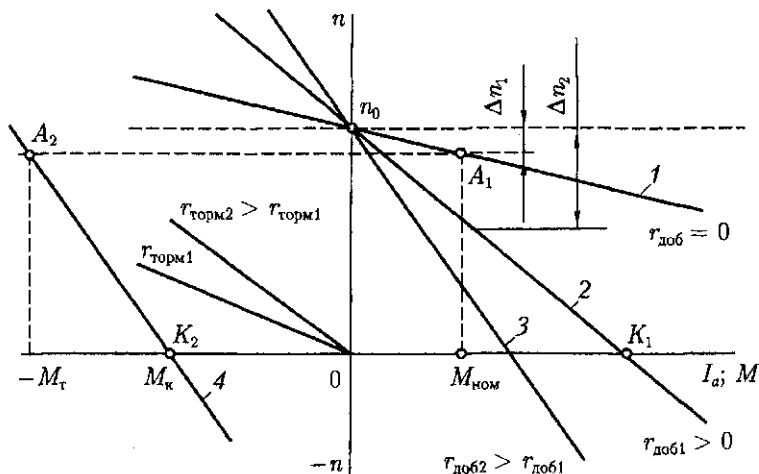


Рис. 27.1. Механические характеристики двигателя постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения

Характеристики двигателей постоянного тока при  $r_{доб} = 0$  называют *естественными* (график 1). Если же в цепь якоря ввести добавочное сопротивление, т.е.  $R = \sum r + r_{доб}$ , то влияние нагрузки на величину  $\Delta n$  будет более значительным, характеристики двигателя станут мягкими и их угол наклона к оси абсцисс увеличится (графики 2 и 3). Такие характеристики называют *искусственными* (реостатными).

Все характеристики двигателя независимо от сопротивления цепи якоря пересекаются в точке идеального холостого хода (пограничной частоты вращения)  $n_0$ . Объясняется это тем, что при идеальном холостом ходе ток якоря и электромагнитный момент равны нулю, а поэтому изменение частоты вращения  $\Delta n = 0$  [см. (27.6) и (27.7)].

Как отмечалось, механические характеристики двигателя постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения прямолинейны [см. (27.5)]. В связи с этим положение любой из этих характеристик в осях координат определяется двумя точками. Одной из них является точка идеального холостого хода с координатами  $n_0$  и  $M = 0$ , а другой — точка номинальной нагрузки двигателя в двигательном (основном) режиме с координатами  $n_{ном}$  и  $M_{ном}$ . Если в цепи якоря отсутствует добавочный резистор ( $R = \sum r$ ), то координаты точки номинальной нагрузки определяются паспортными данными двигателя. Если же в цепь якоря включено добавочное сопротивление, то при номинальном токе якоря частота вращения (об/мин)

$$n'_{ном} = n_{ном} \frac{U_{ном} - I_{аном} (\sum r + r_{доб})}{U_{ном} - I_{аном} \sum r}. \quad (27.8)$$

Для двигателей постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения возможны следующие режимы работы: а) двигательный (основной); б) режим генераторного торможения с отдачей энергии в сеть (рекуперативный); в) режим торможения противключением; г) режим динамического торможения.

**Генераторное торможение с отдачей энергии в сеть (рекуперативное)** наступает при частоте вращения якоря, превышающей частоту вращения идеального холостого хода, т.е. при  $n > n_0$ . В этом случае ЭДС якоря  $E_a$  становится больше напряжения сети  $U_c$  и ток якоря изменяет свое направление (по сравнению с направлением в двигательном режиме), т.е. становится отрицательным:

$$-I_a = (E_a - U_c) / R. \quad (27.9)$$

В связи с изменением направления тока якоря меняет свое направление электромагнитный момент двигателя и становится тормозящим. Характеристики двигателя в этом режиме, являясь продолжением характеристик двигательного режима, располагаются во втором квадранте осей координат. Уравнение характеристик в тор-

возможном генераторном режиме имеет вид, аналогичный (27.5), но величина  $\Delta n$  в этом случае приобретает отрицательный знак [см. (27.6) и (27.7)]:

$$n = n_0 - (-\Delta n) = n_0 + \Delta n. \quad (27.10)$$

Действие тормозного генераторного момента прекращается, как только частота вращения якоря, уменьшаясь, достигнет частоты вращения идеального холостого хода  $n_0$ .

**Торможение противовключением** происходит в том случае, когда изменяют полярность напряжения на клеммах обмотки якоря (полярность клемм обмотки возбуждения должна остаться прежней) и напряжение питания обмотки якоря становится отрицательным ( $-U$ ). Но якорь двигателя под действием кинетической энергии вращающихся масс сохраняет прежнее направление вращения и так как направление магнитного потока не изменилось, ЭДС якоря  $E_a$  также не меняет своего направления и действует согласно с напряжением ( $-U$ ), при этом ток якоря создается суммой напряжения сети  $U$  и ЭДС якоря  $E_a$

$$I_a = (-U - E_a)/R = -(U + E_a)/R. \quad (27.11)$$

В этих условиях ток якоря, а следовательно, и электромагнитный момент становятся *отрицательными* и работа двигателя определяется режимом точки  $A_2$  на характеристике 4 во втором квадранте осей координат (см. рис. 27.1). Чтобы ток якоря в этих условиях не превысил допустимого значения, в цепь обмотки якоря включают резистор  $r_{доб}$ . При этом ток якоря  $I_a$  будет ограничен сопротивлением

$$R = \sum r + r_r.$$

Под действием тормозящего момента  $-M_T$  частота вращения якоря уменьшается, достигнув нулевого значения (точка  $K_2$ ). Если в этот момент цепь якоря не отключить от сети, то произойдет *реверсирование* двигателя и его якорь под действием момента  $M_K$  начнет вращение в противоположную сторону, перейдя в двигательный (основной) режим с отрицательными значениями частоты вращения и вращающего момента.

Чтобы избежать нежелательного реверсирования, операцию торможения противовключением автоматизируют, и тогда при нулевом значении частоты вращения цепь якоря отключается от сети.

Режим торможения противовключением возможен также при работе двигателя в режиме искусственной механической характеристики (см. рис. 27.1, график 2). С ростом статического момента сопротивления  $M_c$  частота вращения якоря постепенно снижается и достигает значения  $n = 0$  (точка  $K_1$ ). Если при этом момент нагрузки  $M_c$  продолжает увеличиваться, то частота вращения становится отрицательной, а электромагнитный момент двигателя, сохраняя прежнее направление, становится тормозящим. Механиче-

ская характеристика двигателя при этом располагается в четвертом квадранте осей координат (графики 2 и 3).

Такой вид торможения противовключением применяется в подъемных устройствах, работающих по принципу лебедки, когда подвешенный к тросу груз создает на барабане статический момент сопротивления  $M_c$ , превышающий электромагнитный момент двигателя, который в этих условиях становится тормозящим и замедляет движение опускающегося груза. В данной лабораторной работе исследуется именно такой вид торможения противовключением. При этом момент  $M_c$  создается на лабораторной установке, благодаря определенному режиму ее работы.

**Динамическое торможение** наступает при отключении обмотки якоря от сети и замыкании ее на резистор сопротивлением  $r_{\text{торм}}$ . Обмотка возбуждения при этом остается по-прежнему подключенной к источнику питания, например к сети. Якорь двигателя продолжает вращение за счет сил инерции, т.е. за счет кинетической энергии, запасенной во вращающихся частях системы электропривода. В режиме динамического торможения двигатель переходит в генераторный режим, но энергия, вырабатываемая при этом, не отдается в сеть, как это имело место в режиме генераторного торможения, а преобразуется в тепловую энергию, выделяясь на сопротивлении  $R = \sum r + r_{\text{торм}}$ .

В режиме динамического торможения ЭДС якоря не изменяет своего направления по сравнению с двигательным режимом, но так как напряжение сети  $U_c = 0$ , то ток якоря, изменив свое направление, действует согласно с ЭДС якоря (а не против ЭДС, как это происходит в двигательном режиме). Другими словами, ток якоря в режиме динамического торможения имеет отрицательное направление (рис. 27.1, второй квадрант). В этом режиме ток якоря

$$I_a = (0 - E_a)/R, \quad (27.12)$$

где  $R = \sum r + r_{\text{торм}}$  — тормозной момент (Н·м)

$$-M = c_x c_e \Phi^2 n / R, \quad (27.13)$$

т.е. так же, как и ток якоря, отрицательный.

Из выражения (27.13) следует, что торможение якоря происходит до полной остановки якоря, т.е. до  $n = 0$ .

Характеристики электродвигателя в режиме динамического торможения выходят из начала координат и располагаются во втором квадранте. С увеличением сопротивления  $r_{\text{торм}}$  жесткость этих характеристик уменьшается. Уравнение характеристик в режиме динамического торможения получают из (27.5). Но так как в этом режиме электродвигатель отключен от сети ( $U_c = 0$ ), то  $n_0 = 0$  и поэтому уравнение принимает вид

$$n = -\Delta n. \quad (27.14)$$

Таблица 27.1

Режимы работы двигателя	$U_c$	$E_a$	$I_a R$	$I_a$
Двигательный (основной)	→	←	←	$I_a = (U_c - E_a)/R$
Генераторный тормозной	→	←	→	$-I_a = (U_c - E_a)/R$
Торможения противовключением	←	←	→	$-I_a = (-U_c - E_a)/R$
Динамический тормозной	0	←	→	$-I_a = (-E_a)/R$
Короткого замыкания ( $n = 0$ )	→	0	←	$I_a = U_c/R$
Идеального холостого хода ( $n = n_0$ )	→	←	0	$I_a = 0$

При расчете  $\Delta n$  по (27.6) или (27.7) ток якоря принимают отрицательным, поэтому величина  $\Delta n$  становится отрицательной и с учетом знака минус в (27.14) уравнение принимает вид  $n = \Delta n$ . При построении характеристик для режима динамического торможения частота вращения откладывается в положительном направлении оси ординат (см. рис. 27.1).

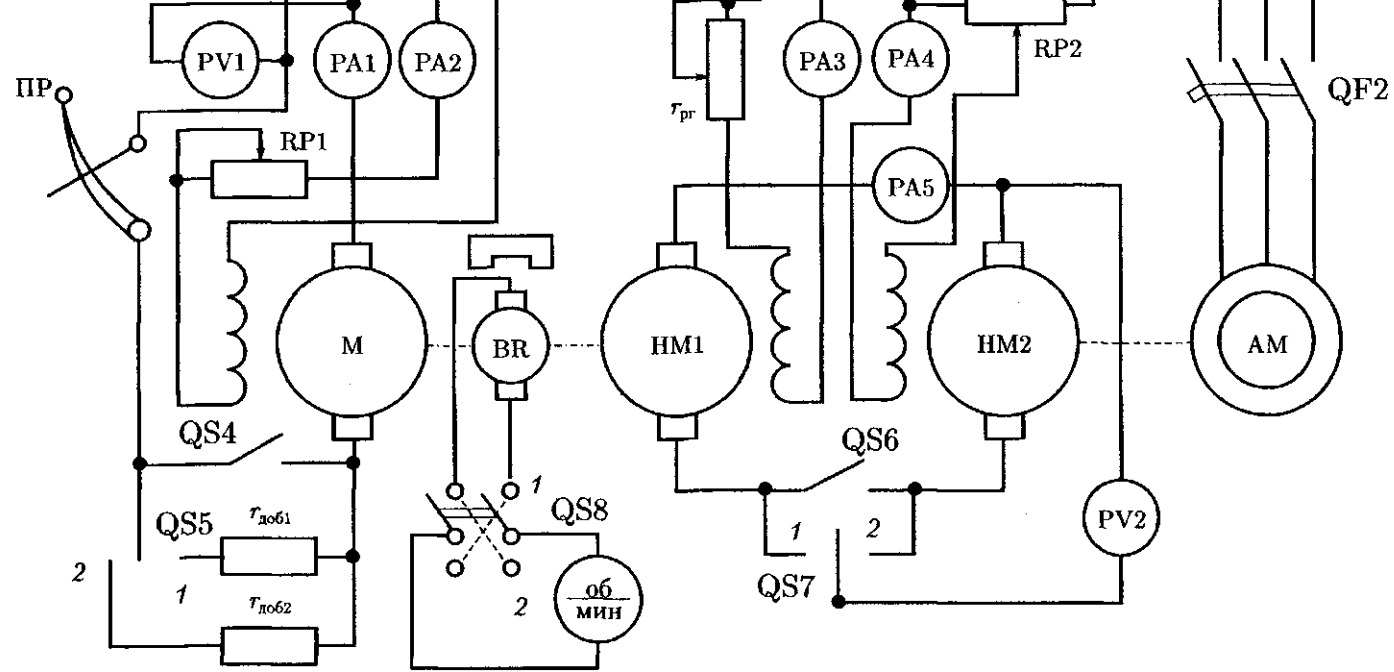
Изложенное о режимах двигателя постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения иллюстрируется табл. 27.1, где для разных режимов работы электродвигателя стрелками показаны взаимные направления напряжения сети  $U_c$ , ЭДС якоря  $E_a$  и падения напряжения в цепи якоря  $I_a R$ . Там же приведены выражения для определения тока якоря.

### Лабораторная установка

Воспроизведение всех режимов работы и торможения двигателя постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения возможно на лабораторной установке, состоящей из четырех электрических машин (рис. 27.2):

- 1) электродвигателя постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения М (исследуемый электродвигатель);
- 2) нагрузочной машины НМ1 постоянного тока независимого возбуждения, механически соединенной с электродвигателем М;
- 3) нагрузочной машины НМ2 постоянного тока независимого возбуждения;
- 4) трехфазной асинхронной машины АМ (трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором), механически соединенной с нагрузочной машиной НМ2.

Обмотка якоря нагрузочной машины НМ1 соединена с обмоткой якоря нагрузочной машины НМ2 таким образом, что машины образуют систему «генератор — двигатель». При этом, если машина НМ1 работает в режиме генератора, то машина НМ2 — в режиме двигателя; если же машина НМ1 перейдет в режим двигателя, то машина НМ2 — в режим генератора. Это, в свою очередь, определит



режимы работы исследуемого двигателя М и трехфазной асинхронной машины АМ.

Ток возбуждения нагрузочной машины НМ1 регулируется реостатом  $r_{р1}$ . В течение всего опыта этот ток поддерживается неизменным, равным номинальному, значение которого должно быть указано в паспортных данных этой машины. Ток возбуждения нагрузочной машины НМ2 регулируется в широких пределах потенциометром РР2. При этом переключатель QС3 позволяет менять направление этого тока, что дает возможность изменять напряжение на выходе НМ2 как по величине, так и по направлению. Цепи якоря нагрузочных машин НМ1 и НМ2 замыкаются ключом QС6. Ток в этой цепи измеряют амперметром РА5, а напряжение — вольтметром РV2. Переключатель QС7 позволяет одним вольтметром РV2 измерить напряжение как в цепи якоря машины НМ1, так и машины НМ2 (при разомкнутом ключе QС6). Приборы РА1, РА4, РА5 и РV2 должны иметь двустороннюю шкалу.

Включение в сеть трехфазной асинхронной машины осуществляется автоматом QF2, включение в сеть постоянного тока цепи якоря исследуемого двигателя М выполняется автоматом QF1. Для ограничения пускового тока в цепь якоря двигателя М включен двухзажимный пусковой реостат РР. В цепь якоря этого двигателя включены вольтметр РV1 и амперметр РА1 и добавочные резисторы  $r_{доб1}$  и  $r_{доб2}$ . Посредством ключа QС5 эти резисторы могут включаться в цепь якоря поочередно. В то же время ключ QС4 позволяет замкнуть цепь якоря исследуемого двигателя без добавочных резисторов.

Для измерения частоты вращения исследуемого двигателя М в установке применен тахогенератор ВР с измерительным прибором «об/мин». Этот прибор подключен к тахогенератору через переключатель QС8, позволяющий менять полярность подводимого к прибору напряжения при изменении направления вращения якоря электродвигателя (в режиме торможения противовключением).

Для создания различных режимов работы исследуемого двигателя М меняют условия работы нагрузочной машины НМ1: то она используется как нагрузочный генератор для двигателя М в его двигательном (основном) режиме, то как двигатель, приводящий двигатель М во вращение с частотой  $n > n_0$ , т. е. переводя его в генераторный режим.

Асинхронная АМ и нагрузочная НМ2 машины образуют агрегат постоянной скорости. В лабораторной установке этот агрегат составляет промежуточное звено, через которое передается энергия либо от сети переменного тока в сеть постоянного тока, либо, наоборот, из сети постоянного тока в сеть переменного тока. Наличие такого звена делает лабораторную установку весьма экономичной, так как расход энергии в ней при выполнении опытов сводится к компенсации потерь в электрических машинах, составляющих эту установку.

Прежде чем приступить к выполнению опытов, необходимо записать данные лабораторной установки.

### Электродвигатель М

Номинальная мощность $P_{\text{ном}}$ .....	кВт
Номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$ .....	В
Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$ .....	об/мин
Номинальный ток $I_{\text{ном}}$ .....	А
Номинальный ток возбуждения $I_{\text{в,ном}}$ .....	А
Электрическое сопротивление цепи якоря (при рабочей температуре) $\Sigma r$ .....	Ом

### Нагрузочные машины НМ1 и НМ2

Номинальная мощность $P_{\text{ном}}$ .....	кВт
Номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$ .....	В
Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$ .....	об/мин
Номинальный ток якоря $I_{\text{а,ном}}$ .....	А
Номинальный ток возбуждения $I_{\text{в,ном}}$ .....	А

### Трехфазная асинхронная машина АМ

Номинальная мощность $P_{\text{ном}}$ .....	кВт
Номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$ .....	В
Номинальный ток статора $I_{\text{с,ном}}$ .....	А
Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$ .....	об/мин

### Порядок выполнения работы

**Подготовка лабораторной установки к проведению экспериментов.** Ознакомившись с устройством лабораторной установки, назначением входящих в нее коммутирующих и регулирующих устройств, а также назначением каждого измерительного прибора и получив разрешение преподавателя, подготавливают лабораторную установку к проведению опытов.

В первую очередь проверяют положение всех автоматов, рубильников, ключей и переключателей. Все эти устройства должны находиться в положении «Выключено». Затем замыкают рубильники QS1 и QS2 и потенциометром RP1 и реостатом  $r_{\text{рг}}$  устанавливают в цепях возбуждения двигателя М и нагрузочной машины НМ1 номинальные значения токов возбуждения, которые в дальнейшем поддерживают неизменными.

Включением автомата QF1 подают напряжение в цепь якоря двигателя М, который приводится во вращение. Ключ QS4 при этом должен быть замкнут, а ключ QS6 — разомкнут. Переключатель QS8 ставят в положение 1, при котором прибор «об/мин» указывает частоту вращения. Включив автомат QF2, запускают асинхронную машину АМ (в двигательном режиме). Поставив переключатель QS3 в одно из положений, включают в сеть постоянного тока цепь воз-



буждения нагрузочной машины НМ2. Затем ставят переключатель QS7 сначала в положение 1, а затем в положение 2 и вольтметром PV2 измеряют напряжение сначала в цепи якоря машины НМ1, а затем в цепи якоря машины НМ2. Если полярность этих напряжений оказалась неодинаковой, то переключатель QS3 ставят в другое положение, добившись этим одинаковой полярности на выводах цепей якоря нагрузочных машин. Потенциометром RP2 регулируют ток в обмотке возбуждения машины НМ2 таким образом, чтобы получить одинаковые напряжения на выводах цепей якоря машин НМ1 и НМ2. После этого замыкают ключ QS6. При этом ток в цепи якорей этих машин должен быть равным нулю (см. амперметр PA5).

**Определение момента потерь.** Исследуемый двигатель М и нагрузочная машина НМ1 механически соединены муфтой, что создает некоторые трудности при определении момента  $M_2$  на валу исследуемого двигателя. Вызвано это тем, что при работе лабораторной установки в нагрузочной машине НМ1 имеют место магнитные и механические потери, которые следует учитывать при расчете момента  $M_2$  на валу двигателя М, определяемого по формуле ( $H \cdot m$ )

$$M_2 = M_{HM1} \pm \Delta M, \quad (27.15)$$

где  $M_{HM1}$  — момент нагрузочной машины НМ1,  $H \cdot m$ ,

$$M_{HM1} = 9,55 U_{H.M} I_{H.M} / n, \quad (27.16)$$

где  $U_{H.M}$  и  $I_{H.M}$  — напряжение и ток в цепи якорей нагрузочных машин.

Момент  $M_2$  на валу двигателя М отличается от момента нагрузочной машины  $M_{HM1}$  на величину момента потерь  $\Delta M$ . Если исследуемый двигатель работает в основном (двигательном) режиме, то в формуле (27.15) применяют знак плюс, а если этот двигатель работает в генераторном режиме — то знак минус.

Значения момента потерь  $\Delta M$  в виде графика  $\Delta M = f(n)$  обычно приводятся в технических данных лабораторной установки. Если же такого графика нет, то его можно построить, проведя следующий эксперимент. Сначала проверяют положение всех автоматов, рубильников, переключателей и ключей — они должны находиться в положении «Выключено». Затем рубильником QS2 подают напряжение в цепь возбуждения машины НМ1, реостатом  $r_{pc}$  устанавливают в этой цепи номинальное значение тока возбуждения.

Включив автомат QF2, пускают в ход асинхронную машину АМ (в двигательном режиме), а затем, поставив движок потенциометра RP2 в положение, соответствующее минимальному напряжению, ставят переключатель QS3 в одно из положений. Замкнув цепь якорей нагрузочных машин ключом QS6, постепенно увеличивают ток возбуждения машины НМ2, работающей в генераторном режиме. При этом в якорной цепи нагрузочных машин появляется ток и машина НМ1 начинает работать в двигательном режиме, приводя

Таблица 27.2

Номер измерения	$U_0$ , В	$I_0$ , А	$n$ , об/мин	$\Delta M$ , Н·м

во вращение якорь двигателя М (автомат QF1 и рубильник QS1 при этом выключены, т. е. двигатель М полностью отключен от сети).

Постепенно увеличивая ток возбуждения машины НМ2, доводят частоту вращения НМ1 до допустимого значения. Приблизительно через одинаковые интервалы частоты вращения  $n$  снимают показания приборов РВ2 и РА5 и заносят их в табл. 27.2.

Делают 8—10 замеров. Затем, отключив все рубильники, останавливают лабораторную установку.

Значения момента потерь  $\Delta M$  определяют по формуле (Н·м)

$$\Delta M = 9,55 U_0 I_0 / n, \quad (27.17)$$

где  $U_0$  и  $I_0$  — напряжение и ток в якорной цепи нагрузочных машин при отключенных от сети цепей якоря и возбуждения исследуемого двигателя М.

По данным таблицы строят график  $\Delta M = f(n)$ .

**Снятие данных для построения естественной механической характеристики.** Данные для построения этой характеристики снимают при номинальном напряжении сети, номинальных значениях тока возбуждения в исследуемом двигателе М и нагрузочной машине НМ1, без добавочных резисторов в цепи якоря двигателя М (ключ QS4 замкнут). Включают в сеть (автомат QF2) асинхронную машину АМ, которая работает в двигательном режиме, вращая якорь нагрузочной машины НМ2. Снятие данных начинают с режима генераторного торможения с отдачей энергии в сеть, а затем постепенно переходят в двигательный (основной) режим. Для этого потенциометром РР2 увеличивают ток возбуждения нагрузочной машины НМ2. При этом нагрузочная машина НМ2 начинает работать в генераторном режиме, а НМ1 — в двигательном режиме и разгоняет якорь двигателя М до частоты вращения идеального холостого хода  $n_0$ . О достижении такой частоты вращения будет свидетельствовать нулевое показание амперметра РА1. Затем частота вращения начинает превышать  $n_0$  и исследуемый двигатель переходит в генераторный режим. При этом ток якоря двигателя М меняет свое направление, т. е. становится отрицательным (см. РА1).

В режиме генераторного (рекуперативного) торможения с отдачей энергии в сеть исследуемый двигатель М работает в режиме генератора, нагрузочная машина НМ1 — в режиме двигателя, нагрузочная машина НМ2 — в режиме генератора, асинхронная машина АМ — в режиме двигателя. Электроэнергия из трехфазной сети переменного

Таблица 27.3

Номер измерения и вычисления	Измерения			Вычисления			Примечание	
	$n$ , об/мин	$I_a$ , А	$I_{н.м}$ , А	$U_{н.м}$ , В	$P_{н.м}$ , Вт	$\Delta M$ , Н·м		$M_{НМ1}$ , Н·м
								$r_{доб} = \dots$ Ом

тока передается в сеть постоянного тока, частично расходуясь на покрытие потерь в электрических машинах лабораторной установки.

Доведя частоту вращения двигателя М до допустимого значения при токе якоря в цепи двигателя М не более  $1,25 I_{aном}$ , потенциометром RP2 постепенно уменьшают ток возбуждения машины НМ2. При этом понижается величина тока  $I_{н.м}$  в цепи якорей нагрузочных машин. Частоты вращения НМ1, а следовательно, и двигателя М начнут уменьшаться. При частоте вращения  $n < n_0$  режим генераторного торможения исследуемого двигателя М прекращается и начинается двигательный (основной) режим, а ток якоря этого двигателя уменьшается и, пройдя через нулевое значение при  $n = n_0$ , вновь нарастает (в другом направлении).

Исследуемый двигатель начинает работать в двигательном режиме, приводя во вращение нагрузочную машину НМ1, которая переходит из двигательного в генераторный режим, а нагрузочная машина НМ2 — в двигательный режим. Асинхронная машина АМ теперь работает в генераторном режиме, отдавая энергию в сеть. Ток возбуждения машины НМ2 постепенно уменьшают. При этом частота вращения якоря НМ2 увеличивается, ток  $I_{н.м}$  нарастает, что ведет к увеличению тока якоря  $I_a$  исследуемого двигателя. При достижении этим током значения  $1,25 I_{aном}$  опыт прекращают. Таким образом, данные для построения естественной механической характеристики в течение данного опыта снимают лишь в двух режимах: генераторном тормозном (рекуперативном) и двигательном (основном). Для каждого из этих режимов следует сделать не менее четырех-пяти замеров и занести показания приборов и результаты вычислений в табл. 27.3. Расчет момента  $M_2$  двигателя М ведут по (27.15) и (27.16). При этом необходимо иметь в виду, что в генераторном режиме работы исследуемого двигателя перед величиной  $\Delta M$  следует поставить знак минус, а при двигательном (основном) режиме — знак плюс. Мощность в цепи якоря нагрузочных машин  $P_{н.м} = U_{н.м} I_{н.м}$ .

**Снятие данных для построения искусственных механических характеристик.** Искусственные характеристики снимают при номинальном напряжении сети и номинальном токе возбуждения исследуемого двигателя. При этом в цепь якоря исследуемого двигателя должен быть включен добавочный резистор  $r_{доб}$  (ключ QS4 разомкнут, ключ QS5 сначала замыкают в положение 1, а затем в другой части этого опыта — в положение 2).

Опыт начинают с генераторного тормозного режима ( $n > n_0$ ) исследуемого двигателя М. Затем потенциометром RP2 уменьшают ток возбуждения машины НМ2, работающей в генераторном режиме. При этом ток в цепи якорей машин НМ2 и НМ1 уменьшается, также уменьшается частота вращения машины НМ1, работающей в двигательном режиме. Двигатель М при уменьшении частоты вращения до величины  $n_0$  из генераторного режима переходит в двигательный режим (см. рис. 27.1, график 2). Нагрузочная машина НМ1 переходит в генераторный режим, машина НМ2 — в двигательный режим, асинхронная машина АМ — в генераторный режим, отдавая энергию в трехфазную сеть. При дальнейшем уменьшении тока возбуждения машины НМ2, работающей в режиме двигателя, ток в цепи якорей нагрузочных машин  $I_{н.м}$  возрастает, а также увеличивается нагрузочный момент на валу двигателя М. При этом частота вращения двигателя М понижается, пока не достигнет нулевого значения, что соответствует режиму короткого замыкания двигателя М (точка  $K_1$ ). В этот момент переключатель QS3 в цепи возбуждения машины НМ2 следует перевести в другое положение. При этом ток в цепи якорей нагрузочных машин меняет направление на противоположное и машина НМ1 переходит в двигательный режим, вращая якорь двигателя М противоположно направлению его электромагнитного момента. Другими словами, двигатель М переходит в режим торможения противовключением. При этом механическая характеристика двигателя М перейдет в четвертый квадрант осей координат (см. рис. 27.1, график 2), электромагнитный момент двигателя М станет тормозящим. Машина НМ1 будет работать в двигательном режиме, машина НМ2 — в генераторном режиме, асинхронная машина АМ — в двигательном режиме. Энергия поступает из сети переменного тока и расходуется на покрытие потерь во всех машинах лабораторной установки и на нагрев сопротивлений  $R = \sum r + r_{доб}$  в цепи якоря исследуемого двигателя М.

Ток возбуждения машины НМ2 увеличивают до тех пор, пока ток якоря двигателя М не достигнет предельно допустимого значения.

Эту часть опыта следует проводить по возможности быстро, чтобы не вызвать чрезмерного перегрева электрических машин лабораторной установки.

Следует иметь в виду, что при переходе в режим торможения противовключением меняется направление вращения якоря иссле-

Таблица 27.4

Номер измерения и вычисления	Измерения				Вычисления				Примечание
	$n$ об/мин	$I_a$ А	$I_{н.м}$ А	$U_{н.м}$ В	$P_{н.м}$ Вт	$\Delta M$ Н·м	$M_{НМ1}$ Н·м	$M_2$ Н·м	
									$r_{доб} = \dots$ Ом

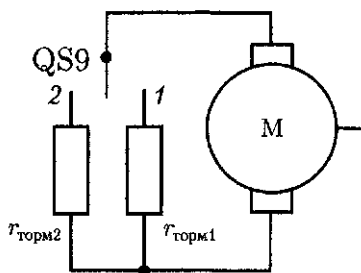


Рис. 27.3. Схема включения обмотки якоря двигателя при динамическом торможении

дуемого двигателя М. В этих условиях переключатель QS8 необходимо перевести в положение 2 и записывать показания прибора «об/мин» со знаком минус.

Показания приборов, снятые через приблизительно одинаковые интервалы тока якоря двигателя  $I_a$ , заносят в табл. 27.4. Делают по четыре-пять замеров при каждом  $\tau_{доб}$ . Опыт выполняют два раза — сначала с добавочным резистором  $r_{доб1}$  (ключ QS5 в положении 1), а затем с добавочным резистором  $r_{доб2}$  (ключ QS5

в положении 2). Значения момента  $M_2$  определяют по (27.15) и (27.16).

**Снятие данных для построения механических характеристик в режиме динамического торможения.** Для создания режима динамического торможения необходимо изменить схему включения исследуемого двигателя М: отключить обмотку якоря от сети постоянного тока и присоединить ее к резисторам  $r_{торм}$  через ключ QS9 (рис. 27.3). В остальном схема лабораторной установки остается прежней.

Данные для построения характеристик при динамическом торможении двигателя снимают следующим образом. Ставят ключ QS9 в положение 1 — цепь якоря замыкают на резистор  $r_{торм1}$ . Включением автомата QF2 (см. рис. 27.2) запускают асинхронную машину АМ и потенциометром RP2 постепенно увеличивают ток возбуждения нагрузочной машины НМ2, работающей в генераторном режиме. Машина НМ1 при этом работает в двигательном режиме и приводит во вращение якорь исследуемого двигателя М, который, в свою очередь, работает в режиме генератора с отдачей электроэнергии на нагрев сопротивлений в цепи якоря  $R = \sum r + r_{торм1}$ .

Создаваемый двигателем М электромагнитный момент оказывает на якорь тормозящее действие. Постепенно увеличивая ток возбуждения машины НМ2, вызывают увеличение частоты вращения машины НМ1, а следовательно, и частоты вращения исследуемого двигателя М. При этом ЭДС и ток якоря двигателя М будут возрастать, что повысит тормозной момент. Показания приборов через при-

Таблица 27.5

Номер измерения	$I_a$ , А	$n$ , об/мин	$M$ , Н·ж	$I_a$ , А	$n$ , об/мин	$M$ , Н·ж
	$r_{торм1} = \dots$ Ом			$r_{торм2} = \dots$ Ом		

близительно одинаковые интервалы тока якоря двигателя М заносят в табл. 27.5. Снимают пять-шесть показаний. Затем ключ QS9 (см. рис. 27.3) переводят в положение 2, т.е. замыкают цепь якоря двигателя на резистор  $r_{\text{торм}2}$ , и опыт повторяют. Значения тормозного момента определяют по (27.15) и (27.16).

По данным табл. 27.3, 27.4 и 27.5 в одних осях координат строят механические характеристики двигателя М для разных режимов работы (см. рис. 27.1).

### Анализ результатов лабораторной работы

При анализе результатов лабораторной работы следует сделать вывод о соответствии полученных опытных данных теоретическим положениям. Например, каково влияние сопротивления в цепи якоря на жесткость механических характеристик для различных режимов работы двигателя М. Следует иметь в виду, что из-за некоторой неточности измерений и расчетов параметров возможен «разброс» точек характеристик, что приводит к некоторой криволинейности характеристик, которые согласно теоретическим сведениям должны быть прямолинейными.

Таблица 27.6

Диапазоны изменения частоты вращения электродвигателя М	Режимы работы электрических машин			
	Электродвигатель М	Нагрузочные машины		Асинхронная машина АМ
		НМ1	НМ2	
	Генераторный тормозной			
	Двигательный (основной)			
	Тормозной противовключением			
	Динамического торможения			

Анализируя работу лабораторной установки во время опытов, необходимо определить режимы работы электрических машин при исследовании двигателя М в режимах генераторного торможения, двигательном (основном), торможения противовключением и динамического торможения. Установив режимы работы электрических машин, следует заполнить табл. 27.6.

### Контрольные вопросы

1. Почему естественные и искусственные механические характеристики двигателя постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения пересекаются в одной точке?

2. Какие причины влияют на жесткость механических характеристик двигателя параллельного (независимого) возбуждения?
3. В каких квадрантах осей координат располагаются механические характеристики двигателя параллельного (независимого) возбуждения?
4. Укажите, в каких режимах работают электрические машины лабораторной установки (см. рис. 27.2) при работе исследуемого двигателя в генераторном тормозном режиме.
5. Почему в режиме идеального холостого хода ток якоря двигателя параллельного (независимого) возбуждения равен нулю?
6. В каких режимах работы исследуемого двигателя нагрузочная машина НМ2 работает как генератор, а в каких — как двигатель?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 28

### Исследование механических характеристик трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором

**Цель работы.** Приобрести практические навыки в выполнении опытов по снятию данных и построению механических характеристик трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором при различных режимах его работы; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о механических характеристиках этого двигателя.

#### Программа работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, записать паспортные данные электрических машин и измерительных приборов.
2. Снять данные и построить график момента потерь  $\Delta M = f(n)$ .
3. Снять данные для построения естественной и искусственной механических характеристик двигателя.
4. Снять данные для построения механической характеристики двигателя в режиме динамического торможения.
5. Построить механические характеристики по данным опытов (п. 3 и 4).
6. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

#### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал: уравнения механической характеристики асинхронного электродвигателя; механические характеристики асинхронного двигателя (естественные и искусственные) в различных режимах — двигательном (основном), генераторном тормозном (рекуперативном), тормозном противоключением, динамического торможения.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

### Основные понятия

Электромагнитный момент асинхронного двигателя

$$M = \frac{3U_1^2 r_2' / s}{2\pi f_1 \left[ (r_1 + r_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}, \quad (28.1)$$

где  $U_1$  — напряжение (фазное), подведенное к обмотке статора, В;  $f_1$  — частота тока в обмотке статора, Гц;  $r_1$  и  $x_1$  — активное и индуктивное сопротивления обмотки статора, Ом;  $r_2'$  и  $x_2'$  — приведенные значения активного и индуктивного сопротивлений обмотки ротора, Ом;

$$s = (n_1 - n_2) / n_1 \quad (28.2)$$

— скольжение;  $n_1$  — синхронная частота вращения, об/мин;  $n_2$  — частота вращения ротора, об/мин.

В выражении электромагнитного момента (28.1) единственной переменной величиной, влияющей на электромагнитный момент  $M$ , является скольжение  $s$ . Поэтому, задавшись рядом значений скольжения и рассчитав для каждого из них величину момента, а затем, пересчитав эти значения скольжения на частоту вращения ротора  $n_2$ , получают данные для построения механической характеристики асинхронного двигателя  $n_2 = f(M)$ .

Анализируя полученную характеристику (рис. 28.1), видим, что для асинхронного двигателя возможно три режима работы:

1) двигательный (основной) режим — при частоте вращения ротора  $n_2$  от 0 до  $n_1$ ;

2) режим рекуперативного торможения (генераторный режим) — при частоте вращения  $n_2$  от  $n_1$  до  $+\infty$ ;

3) режим торможения противовключением — при частоте вращения  $n_2$  от 0 до  $-\infty$ .

На механической характеристике отмечены следующие характерные точки:

$M_n$  — пусковой момент асинхронного двигателя;

$M_{\text{махд}}$  — максимальный момент двигательного режима;

$n_{\text{кр.д}}$  — критическая частота вращения двигательного режима, т. е. частота вращения, соответствующая максимальному моменту  $M_{\text{махд}}$ ;

$M_{\text{махг}}$  — максимальный момент генераторного режима (режима рекуперативного торможения);

$n_{\text{кр.г}}$  — критическая частота вращения генераторного режима, соответствующая максимальному моменту  $M_{\text{махг}}$ ;

$n_0 = n_1$  — пограничная частота вращения, соответствующая переходу двигательного режима асинхронной машины в генераторный; представляет собой частоту вращения идеального холостого хода двигателя.



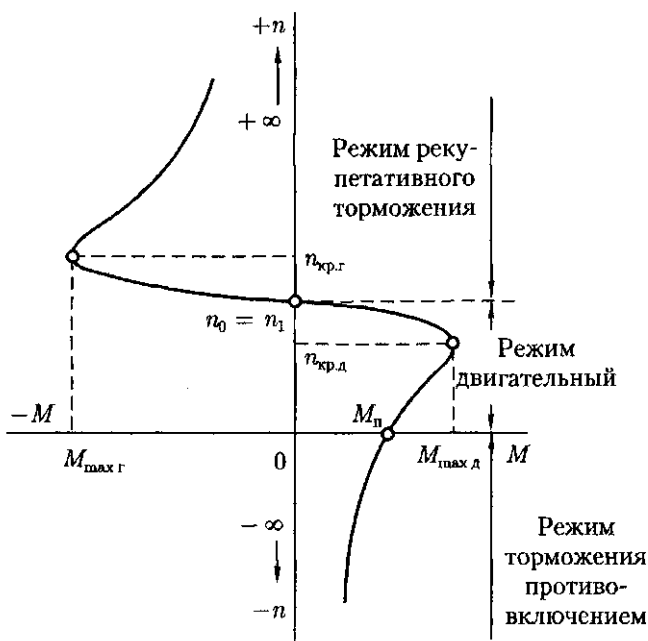


Рис. 28.1. Механическая характеристика асинхронной машины

Критическая частота вращения определяется путем расчета критического скольжения

$$s_{\text{кр}} = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad (28.3)$$

с последующим пересчетом на частоту вращения

$$n_{\text{кр}} = n_1(1 - s_{\text{кр}}). \quad (28.4)$$

Максимальное значение момента асинхронного двигателя (Н·м)

$$M_{\text{max}} = \pm \frac{3U_1^2}{4\pi f_1 \left[ r_1 \pm \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right]}. \quad (28.5)$$

В приведенных выражениях знак плюс соответствует двигательному режиму работы, а знак минус — генераторному режиму работы асинхронного двигателя.

При практических расчетах удобно пользоваться упрощенным выражением электромагнитного момента асинхронного двигателя:

$$M = \frac{2M_{\text{max}}}{\left( s/s_{\text{кр}} \right) + \left( s_{\text{кр}}/s \right)}. \quad (28.6)$$

При расчетах значений момента  $M$ , соответствующих рабочему участку механической характеристики ( $s < s_{кр}$ ), по (28.6) возможная ошибка не превышает допустимого значения.

Для расчета критического скольжения удобно воспользоваться выражением

$$s_{кр} = s_{ном} \left( \lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1} \right), \quad (28.7)$$

которое позволяет рассчитать  $S_{кр}$  по данным каталога.

Здесь

$$\lambda_m = M_{max}/M_{ном}$$

— перегрузочная способность двигателя.

Аналогично двигателям постоянного тока свойства асинхронных двигателей определяются их механическими характеристиками  $n = f(M)$ , которые могут быть естественными ( $r_{доб} = 0$ ) и искусственными ( $r_{доб} > 0$ ).

При введении в цепь ротора двигателя добавочного резистора  $r_{доб}$  работа двигателя происходит в соответствии с искусственной характеристикой. Построение такой характеристики ведется на основании естественной характеристики: задавшись рядом значений момента, определяют соответствующие каждому из них значения скольжения по естественной характеристике, а затем по выражению

$$s_n = s_e (R_2 / r_2) \quad (28.8)$$

находят значения скольжений, соответствующие работе двигателя при включенном в цепь ротора добавочном резисторе сопротивлением  $r_{доб}$ . В выражении (28.8)  $R_2 = r_2 + r_{доб}$ .

При построении механических характеристик по данным, полученным после расчетов по приведенным выше формулам, необходимо предварительно значения скольжения пересчитать на частоту вращения (об/мин).

При построении механических характеристик по опытным данным такого пересчета не требуется, так как частота вращения ротора измеряется непосредственно.

Асинхронный двигатель кроме двигательного (основного) имеет еще три тормозных режима: а) генераторный тормозной (рекуперативный) с отдачей энергии в сеть; б) торможения противовключением; в) динамического торможения.

*Генераторное торможение* с отдачей энергии в сеть наступает при частоте вращения ротора  $n_2$ , превышающей синхронную частоту  $n_1$ . В этом режиме двигатель отдает в сеть активную энергию, а из сети в двигатель поступает реактивная энергия, необходимая для создания в нем вращающегося магнитного поля. Торможение двигателя в этом режиме происходит лишь до синхронной частоты вращения ротора  $n_1$ , так как при этой частоте генераторный режим прекращается.

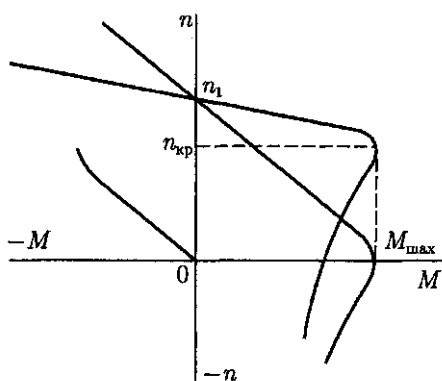


Рис. 28.2. Механические характеристики асинхронного двигателя

Механическая характеристика для генераторного режима является продолжением характеристики двигательного режима во второй квадрант осей координат (рис. 28.2).

Торможение противовключением соответствует направлению вращения магнитного поля статора, противоположному вращению ротора. В этом режиме скольжение становится больше единицы, а частота вращения ротора по отношению к частоте вращения поля статора — отрицательна. Ток в роторе, а следовательно, и в

статоре достигает большой величины. Для ограничения этого тока в цепь ротора вводят добавочное сопротивление.

Режим торможения противовключением наступает при изменении направления вращения магнитного поля статора (переключением двух фаз на выводах обмотки статора), в то время как ротор электродвигателя и механически соединенные с его валом элементы электропривода продолжают вращение по инерции. Этот режим возможен также и в случае, когда поле статора не меняет направления вращения, но ротор электродвигателя под действием внешнего (нагрузочного) момента изменяет направление вращения. При этом механические характеристики электродвигателя являются продолжением характеристик двигательного режима и располагаются в четвертом квадранте осей координат (см. рис. 28.2).

*Динамическое торможение* асинхронного двигателя осуществляется следующим образом: обмотку статора отключают от трехфазной сети и быстро подключают два провода к источнику постоянного тока. Постоянный ток, проходя по обмотке статора, образует магнитное поле, неподвижное относительно сердечника статора. Но так как ротор двигателя продолжает вращение по инерции, то это магнитное поле индуцирует в обмотке ротора переменный ток. Взаимодействие тока ротора с магнитным полем статора создает тормозной момент, величина которого определяется значениями МДС обмотки статора, активного сопротивления обмотки ротора и частоты вращения ротора. Торможение длится до полной остановки ротора. Для более эффективного торможения в цепь ротора вводят активное сопротивление.

Механические характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения располагаются во втором квадранте осей координат (см. рис. 28.2).

## Лабораторная установка

Лабораторная установка для опытного получения данных механических характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором (рис. 28.3) отличается от рассмотренной в лабораторной работе № 27 лишь тем, что вместо двигателя постоянного тока М в ней применен трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором. Двигатель включают в трехфазную сеть на напряжение  $U_1$ , меньше номинального  $U_{1ном}$ . Это позволяет избежать недопустимо больших токов нагрузки двигателя при выполнении опытов. Такое понижение напряжения можно получить, если обмотку статора, рассчитанную для включения в сеть при соединении обмотки в «треугольник», соединить «звездой». В этом случае напряжение на каждой фазной обмотке статора окажется уменьшенным в 1,73 раза.

При построении механических характеристик следует пользоваться значениями момента, пересчитанными на номинальное напряжение. При этом исходят из того, что электромагнитный момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения, подведенного к обмотке статора [см. (28.1)]. Таким образом, момент, приведенный к номинальному напряжению, будет равен

$$M_2 = M'_2 (U_{1ном} / U_1)^2, \quad (28.9)$$

где  $M'_2$  — момент асинхронного двигателя при пониженном напряжении  $U_1$ .

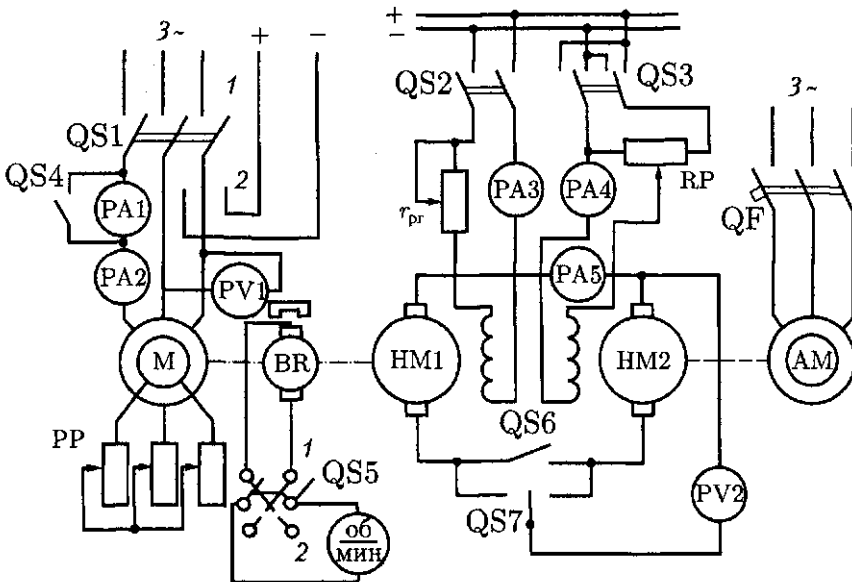


Рис. 28.3. Схема лабораторной установки для снятия данных механических характеристик асинхронного двигателя

Исследуемый двигатель М механически соединен с нагрузочной машиной НМ1. Нагрузочная машина НМ2 механически соединена с трехфазной асинхронной машиной АМ и образует с ней агрегат постоянной скорости. Нагрузочные машины НМ1 и НМ2 электрически соединены между собой по схеме «генератор — двигатель».

Обмотку возбуждения машины НМ1 включают в сеть постоянного тока рубильником QS2. Регулировочным реостатом  $r_{рr}$  в цепи возбуждения НМ1 устанавливают номинальный ток и поддерживают его неизменным при всех опытах. Обмотка возбуждения машины НМ2 подключена к сети постоянного тока через переключатель QS3 и потенциометр RP. Первый позволяет менять направление тока, а второй — его величину.

Для включения асинхронного двигателя М в сеть трехфазного тока необходимо переключатель QS1 поставить в положение 1, а для подключения его к сети постоянного тока (в режиме динамического торможения) переключатель QS1 следует перевести в положение 2.

Для введения в цепь ротора двигателя М добавочного сопротивления служит регулировочный реостат РР, рассчитанный на длительное прохождение тока.

Цепи якорей машин НМ1 и НМ2 замыкают ключом QS6, после того как напряжения в этих цепях будут выровнены по знаку и величине путем регулировки тока возбуждения нагрузочной машины НМ2 с помощью потенциометра RP и переключателя QS3.

В схему лабораторной установки включены следующие измерительные приборы: амперметр PA1, которым измеряют малые значения тока статора  $I_1$ , при возросшем значении этого тока амперметр PA1 шунтируют ключом QS4 и ток измеряют амперметром PA2; амперметры PA3 и PA4, которыми измеряют токи возбуждения нагрузочных машин НМ1 и НМ2; амперметр PA5 измеряет ток в цепи якорей указанных нагрузочных машин; вольтметр PV1 измеряет напряжение  $U_1$ , проводимое к обмотке статора двигателя М; вольтметр PV2 измеряет напряжение в цепи якорей машин НМ1 и НМ2.

Вольтметр PV2 в цепь якорей нагрузочных машин подключается переключателем QS7. Амперметры PA4 и PA5 и вольтметр PV2 должны иметь двустороннюю шкалу. Для измерения частоты вращения  $n$  служит тахогенератор BR с измерительным прибором «об/мин». С помощью переключателя QS5 можно изменять полярность на входе прибора «об/мин» (при изменении направления вращения в режиме торможения противовключением).

Принцип работы лабораторной установки изложен в лабораторной работе № 27.

Ознакомившись с лабораторной установкой, следует записать паспортные данные электрических машин.

## Электродвигатель М

Номинальная мощность $P_{\text{ном}}$ .....	кВт
Номинальное напряжение $U_{1\text{ном}}$ .....	В
Номинальная частота вращения $n_{2\text{ном}}$ .....	об/мин
Номинальный ток статора $I_{1\text{ном}}$ .....	А
Максимальный момент $M_{\text{max}}$ .....	Н · м
Перегрузочная способность $\lambda_M$	
Активное сопротивление обмотки ротора $r_2$ .....	Ом
Добавочное сопротивление в цепи ротора $r_{\text{доб}}$ .....	Ом

Перечень паспортных данных для других машин лабораторной установки приведен в лабораторной работе № 27.

*График момента потерь.* Момент на валу асинхронного двигателя М рассчитывают по (27.15) и (27.16) с использованием графика момента потерь  $\Delta M = f(n)$  (см. лабораторную работу № 27).

### Порядок выполнения работы

#### Снятие данных для построения механических характеристик.

Прежде всего следует подготовить лабораторную установку к проведению опыта. Получив разрешение преподавателя, выполняют следующее (см. рис. 28.3):

а) включают рубильник QS2 и переключатель QS3 и с помощью реостата  $r_{\text{р}}$  и потенциометра RP устанавливают в цепях возбуждения машин НМ1 и НМ2 номинальные токи;

б) включив автомат QF, пускают в ход асинхронную машину АМ;

в) переключателем QS1 подключают двигатель М к трехфазной сети на пониженное напряжение  $U_1$ , предварительно поставив рычаг регулировочного реостата РР в положение наибольшего сопротивления; после разгона ротора двигателя сопротивление этого реостата полностью выводят ( $r_{\text{доб}} = 0$ );

г) регулируя потенциометром РР ток возбуждения машины НМ2, а при необходимости изменив полярность этого тока переключателем QS3, добиваются равенства по величине и согласования по направлению между напряжениями на якорях нагрузочных машин НМ1 и НМ2, после чего ключом QS6 замыкают цепь якорей указанных машин.

После этого приступают к снятию данных естественной механической характеристики. Увеличивают ток возбуждения машины НМ2, при этом машина НМ1 переходит в двигательный режим и приводит во вращение ротор асинхронного двигателя М с частотой вращения  $n_2 > n_1$ . В этих условиях наступает генераторный тормозной режим двигателя М с отдачей активной энергии в сеть трехфазного тока. Частоту вращения доводят до допустимого значения (обычно до  $n_2 = 1,25n_1$ ), делают первый отсчет по приборам, а затем уменьшают ток возбуждения машины НМ2. При этом частота вращения  $n_2$

постепенно снижается и достигает значения  $n_{20} = n_1$ . При дальнейшем уменьшении частоты вращения исследуемый асинхронный двигатель М переходит в двигательный (основной) режим. Продолжая уменьшаться, частота вращения достигает значения  $n_2 = 0$ . При этом наступает режим короткого замыкания. Далее, переводя переключатель QS3 в другое включенное положение, меняют направление тока возбуждения машины НМ2 и начинают увеличивать этот ток.

В этих условиях ток в цепи якорей нагрузочных машин меняет свое направление и машина НМ1 переходит в двигательный режим, вращая ротор двигателя М в сторону, противоположную его вращению в двигательном режиме. При этом двигатель М переходит в режим торможения противовключением, т. е. вращающееся поле статора и ротор двигателя вращаются в разные стороны, и электромагнитный момент двигателя М становится тормозящим.

Ток возбуждения машины НМ2 увеличивают до тех пор, пока ток статора двигателя М не достигнет допустимого значения. В каждом из режимов работы исследуемого двигателя делают по четыре-пять замеров по приборам и показания заносят в табл. 28.1.

Здесь  $M'_2$  представляет собой момент двигателя при пониженном напряжении  $U_1$ , определяемый по (27.15) и (27.16). При использовании (27.15) необходимо иметь в виду, что в генераторных режимах работы исследуемого двигателя перед величиной  $\Delta M$  следует поставить знак минус, а при двигательном (основном) режиме — знак плюс.

Снятие данных для построения искусственной механической характеристики двигателя выполняют в той же последовательности, с той лишь разницей, что в цепь фазного ротора двигателя включают добавочный резистор сопротивлением  $r_{доб}$  (вводят сопротивление регулируемого реостата РР). Значение этого сопротивления обычно принимают таким, чтобы пусковой момент двигателя был максимальным, т. е. чтобы критическое скольжение  $s_{кр} = 1$ .

Опыт начинают с режима генераторного торможения и заканчивают режимом торможения противовключением. Показания приборов заносят в табл. 28.1.

**Снятие данных и построение механической характеристики в режиме динамического торможения.** По окончании предыдущего опыта переключателем QS1 отключают двигатель М от трехфазной

Таблица 28.1

Вид характеристики	Номер измерения	Измерения				Вычисления				Примечание
		$n$ , об/мин	$I_1$ , А	$I_{н.м}$ , А	$U_{н.м}$ , В	$P_{НМ1}$ , Н·м	$M_{н.м}$ , Н·м	$\Delta M$ , Н·м	$M'_2$ , Н·м	
Естественная										$r_{доб} = 0$
Искусственная										$r_{доб} = \dots$ Ом

Таблица 28.2

Номер измерения	$n$ , об/мин	$I_{н.м.}$ А	$U_{н.м.}$ В	$M_{НМ1}$ , Н·м	$\Delta M$ , Н·м	$M_r$ , Н·м

сети и подключают две его фазы к сети постоянного тока, т. е. переключатель переводят из положения 1 в положение 2 (см. рис. 28.3). Регулировочный реостат РР следует оставить введенным — опыт проводят с добавочным сопротивлением в цепи фазного ротора. Напряжение постоянного тока должно быть таким, чтобы ток в обмотке статора не превысил допустимого значения.

Затем, увеличивая ток возбуждения машины НМ2, приводят во вращение машину НМ1. Работая в двигательном режиме, она вращает ротор исследуемого электродвигателя. В результате электромагнитных процессов, обусловленных вращением ротора в неподвижном магнитном поле статора, ротор электродвигателя испытывает электродинамический тормозной момент. Постепенно увеличивая частоту вращения ротора двигателя  $M$ , доводят ее значение до  $n_2 = 0,5n_1$ . При этом через приблизительно одинаковые интервалы частоты вращения снимают показания приборов и заносят их в табл. 28.2. Тормозной момент находят по (27.15), считая режим работы двигателя  $M$  генераторным.

Используя опытные данные, приведенные в табл. 28.1 и 28.2, строят механические характеристики для всех режимов работы и торможения в одной системе координат.

### Анализ результатов лабораторной работы

Вначале делают вывод о соответствии механических характеристик, полученных опытным путем, основным положениям теории о механических характеристиках асинхронных двигателей.

Далее анализируют работу каждой электрической машины, входящей в лабораторную установку в различных режимах работы исследуемого двигателя. При этом следует заполнить таблицу, аналогичную табл. 27.6.

### Контрольные вопросы

1. В каких диапазонах изменяются скольжение и частота вращения асинхронного двигателя в режимах генераторного торможения, двигательном (основном), торможения противовключением и динамического торможения?
2. Как меняется форма характеристики  $n = f(M)$  при увеличении активного сопротивления в цепи ротора?
3. Что такое перегрузочная способность асинхронного двигателя и какова ее зависимость от напряжения, подводимого к обмотке статора?



4. Различаются ли по величине максимальные моменты асинхронного двигателя в двигательном и генераторном режимах?
5. Может ли критическое скольжение асинхронного двигателя иметь значение, превышающее единицу?
6. Как изменится форма механической характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения при увеличении активного сопротивления в цепи ротора?
7. На что расходуется энергия, вырабатываемая в двигателе при его работе в режимах торможения (генераторном, противовключения и динамическом)?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 29**

### **Исследование регулировочных свойств двигателя постоянного тока независимого возбуждения в системе «генератор–двигатель»**

**Цель работы.** Приобрести практические навыки в регулировке двигателя постоянного тока независимого возбуждения в системе «генератор — двигатель»; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о работе системы «генератор — двигатель».

#### **Программа работы**

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, записать паспортные данные электрических машин и измерительных приборов.
2. Выполнить пробный пуск установки, проверить возможность регулировки частоты вращения и реверса двигателя.
3. Снять данные и построить характеристики исследуемого двигателя в основном (двигательном) режиме:
  - а) естественную механическую характеристику при номинальном напряжении в цепи якоря и номинальном токе возбуждения двигателя;
  - б) искусственные механические характеристики при напряжениях в цепи якоря:  $U_{\text{ном}}$ ;  $0,9 U_{\text{ном}}$ ;  $0,75 U_{\text{ном}}$  и номинальном токе возбуждения двигателя;
  - в) искусственные механические характеристики при значениях тока возбуждения двигателя  $M$ :  $I_{\text{в.д. ном}}$ ;  $0,9 I_{\text{в.д. ном}}$ ;  $0,75 I_{\text{в.д. ном}}$  и номинальном напряжении в цепи якоря.
4. Определить кратность регулирования частоты вращения двигателя:
  - а) при снижении напряжения в цепи якоря и неизменном (номинальном) токе возбуждения двигателя;
  - б) при уменьшении тока возбуждения двигателя и неизменном напряжении в цепи якоря;

- в) общую кратность регулирования частоты вращения.  
 5. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал: регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока в системе «генератор – двигатель» изменением напряжения в цепи якоря и основного магнитного потока (тока возбуждения двигателя); механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения в системе «генератор – двигатель»; достоинства и недостатки данной системы.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицу для занесения результатов опыта и координатную сетку для построения графиков.

### Основные понятия

Система «генератор – двигатель» (Г – Д) представляет собой агрегат, состоящий из электромашинного преобразователя переменного тока в постоянный и двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Электромашинный преобразователь состоит из двигателя переменного тока (обычно трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором) АМ и генератора постоянного тока

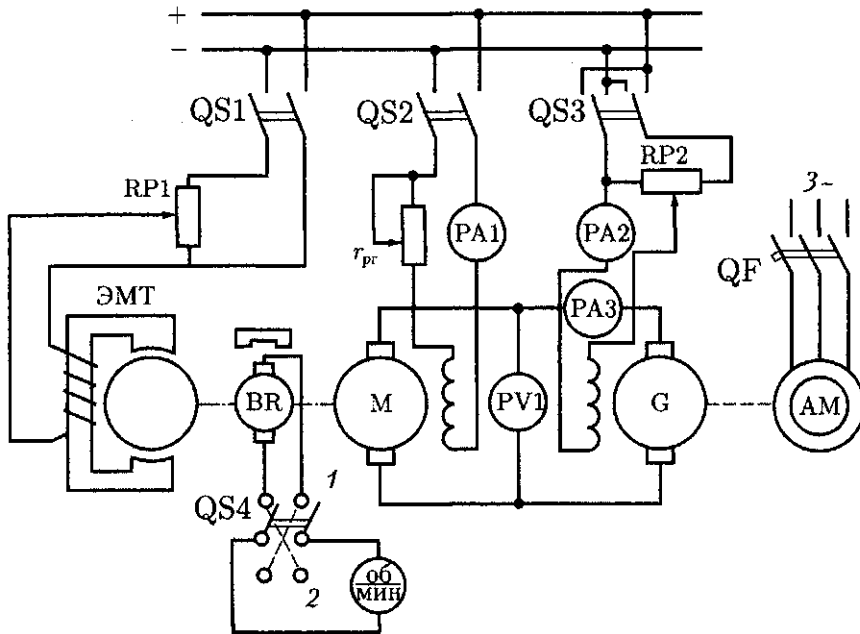


Рис. 29.1. Схема лабораторной установки для исследования двигателя постоянного тока в системе «генератор – двигатель»

тока  $G$  независимого возбуждения (рис. 29.1). Обе машины смонтированы на общем основании, а их валы механически соединены с помощью муфты. Обмотка возбуждения генератора подключена к сети постоянного тока через потенциометр  $RP2$ , который можно изменять величину тока возбуждения  $I_{в.г}$ . К выводам обмотки якоря генератора  $G$  подключена цепь якоря регулируемого двигателя  $M$ . Обмотка возбуждения этого двигателя получает питание от сети постоянного тока через регулировочный реостат  $r_{рг}$ , позволяющий регулировать ток возбуждения  $I_{в.д}$ . Частота вращения двигателя  $M$ , работающего в системе  $\Gamma - Д$ , определяется выражением

$$n = \frac{E_r - I_a (\sum r_{аг} + \sum r_{ад})}{k_e \Phi_d}, \quad (29.1)$$

где  $E_r$  — ЭДС генератора  $G$ , В;  $I_a$  — ток в цепи якорей генератора  $G$  и двигателя  $M$ ;  $\sum r_{аг}$  и  $\sum r_{ад}$  — сопротивления цепей якоря генератора  $G$  и двигателя  $M$ , Ом;  $k_e$  — постоянный коэффициент;  $\Phi_d$  — основной магнитный поток двигателя  $M$ , Вб.

Из выражения (29.1) следует, что регулирование частоты вращения двигателя  $M$  в системе  $\Gamma - Д$  возможно двумя способами: изменением ЭДС генератора  $E_r$ , т. е. регулированием тока возбуждения  $I_{в.г}$ , и изменением основного магнитного потока двигателя  $\Phi_d$ , т. е. регулированием тока возбуждения  $I_{в.д}$ .

Изменение ЭДС генератора  $E_r$  допускается лишь в сторону снижения относительно номинального значения, что соответствует уменьшению частоты вращения якоря двигателя  $M$  вниз от номинального значения. Что же касается тока возбуждения двигателя  $I_{в.д}$ , то его можно изменять только в направлении снижения относительно номинального значения  $I_{в.д.ном}$ , что соответствует увеличению частоты вращения двигателя  $M$  относительно номинального значения. Таким образом, в двигателе независимого возбуждения, работающем в системе  $\Gamma - Д$ , возможны два вида регулирования частоты вращения: вниз от номинальной (изменением ЭДС генератора  $G$ ) и вверх от номинальной (изменением тока возбуждения двигателя  $M$ ).

Применение обоих способов регулирования позволяет получить кратность регулирования частоты вращения двигателя  $M$  в системе  $\Gamma - Д$  до 1 : 200.

Наибольшая частота вращения ограничивается условиями коммутации и неустойчивой работой двигателя при малых значениях потока возбуждения. Наименьшая частота вращения ограничивается двумя причинами: неудовлетворительными условиями охлаждения двигателя  $M$  (если двигатель самовентилирующийся) и неустойчивым вращением якоря двигателя при слишком малых частотах вращения.

Работа двигателя  $M$  в системе  $\Gamma - Д$  дает возможность избежать применения пускового реостата, так как система  $\Gamma - Д$  позволяет

плавно повышать напряжение в цепи якоря, не вызывая значительных бросков пускового тока.

На рис. 29.2 представлены механические характеристики двигателя М в системе Г—Д. Эти характеристики прямолинейны и практически параллельны друг другу, что обеспечивает электроприводу хорошие регулировочные свойства. График  $n = f(M)$ , пересекающий ось ординат в точке  $n_{0e}$  (пограничная частота вращения), представляет собой естественную механическую характеристику. Эта характеристика снята при номинальном напряжении в цепи якоря двигателя М и номинальном токе возбуждения  $I_{в.д.ном}$ . Пограничная частота вращения двигателя М

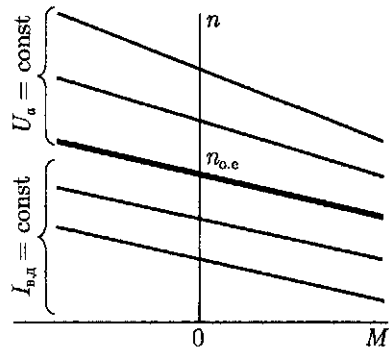


Рис. 29.2. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения в системе «генератор — двигатель»

Пограничная частота вращения двигателя М

$$n_{0e} = E_{г.ном} / (k_e \Phi_d), \quad (29.2)$$

где  $E_{г.ном}$  — ЭДС генератора Г, равная номинальному напряжению в цепи якоря двигателя М.

Прямые линии, расположенные ниже естественной характеристики, представляют собой искусственные механические характеристики, снятые при номинальном токе возбуждения  $I_{в.д.ном}$ , но при напряжениях якоря, меньших номинального. Прямые линии, расположенные выше естественной характеристики, представляют собой искусственные механические характеристики, снятые при номинальном напряжении якоря, но при значениях тока возбуждения, меньших номинального.

Параллельность и прямолинейность механических характеристик двигателя М в системе Г—Д объясняются тем, что действия реакции якоря в двигателе М и генераторе Г взаимно компенсируются. Исключение составляют характеристики, соответствующие малым значениям тока возбуждения, когда магнитное поле двигателя М значительно ослаблено.

Реверсирование двигателя М осуществляют изменением направления тока в обмотке возбуждения генератора Г посредством переключателя QS3 (см. рис. 29.1).

Если двигатель М работает в условиях резко изменяющейся нагрузки, то на вал приводного двигателя АМ помещают маховик, который запасает кинетическую энергию в период снижения нагрузки на двигатель М и отдает ее в период возрастания нагрузки.

В системе Г—Д возможно генераторное торможение с рекуперацией (отдачей электроэнергии в сеть). Это достигается тем, что при

вращении якоря двигателя М по инерции уменьшают ток возбуждения генератора G и увеличивают ток возбуждения двигателя М. При этом понижается ЭДС генератора  $E_G$  и возрастает противоЭДС двигателя  $E_D$ . В итоге двигатель М переходит в генераторный режим — момент на его якоре становится тормозящим, а генератор G по отношению к двигателю АМ переходит в двигательный режим. Что же касается двигателя АМ, то он переходит в генераторный режим и отдает энергию в сеть, т. е. наступает процесс рекуперации. На рис. 29.2 этому режиму соответствуют механические характеристики двигателя М, расположенные во втором квадранте осей координат.

Обобщая изложенное, отметим некоторые *достоинства* работы двигателя в системе Г—Д:

- а) широкий диапазон регулирования частоты вращения;
- б) плавный пуск двигателя без применения пускового реостата;
- в) возможность торможения с частичным возвратом энергии в сеть.

*Недостатки* системы:

- а) громоздкость и высокая стоимость установки, сложность ее обслуживания, большой шум;
- б) невысокий КПД системы, определяемый произведением КПД всех электрических машин:

$$\eta_{Г-Д} = \eta_G \eta_D \eta_{AM}; \quad (29.3)$$

в) значительная электромагнитная инерционность, замедляющая переходные процессы в двигателе, обусловленная большой индуктивностью обмотки возбуждения генератора, через которую осуществляются все регулировки двигателя М при переходных процессах (пуск, торможение, реверсирование).

### Лабораторная установка

Лабораторная установка для исследования двигателя постоянного тока в системе Г—Д (см. рис. 29.1) состоит из агрегата постоянной скорости, представляющего собой электромашинный преобразователь переменного тока в постоянный, и исследуемого двигателя постоянного тока независимого возбуждения М. Агрегат постоянной скорости состоит из двух электрических машин: трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором АМ и генератора постоянного тока независимого возбуждения G, валы которых механически соединены муфтой. Цепь якоря двигателя М присоединена к выводам цепи якоря генератора G. Обмотки возбуждения этих машин подключены к сети постоянного тока. При этом обмотка возбуждения генератора включена в эту сеть через потенциометр RP2, позволяющий регулировать ток возбуждения  $I_{в,Г}$  в широких пределах, и через переключатель QS3, с помощью которого можно изменять направление тока в цепи возбуждения. Об-

мотка возбуждения двигателя М подключается в сеть постоянного тока рубильником QS2, а ток возбуждения в этой обмотке  $I_{в.д}$  можно регулировать реостатом  $r_{рг}$ . Для механической нагрузки исследуемого двигателя применен электромагнитный тормоз ЭМТ, обмотка которого включена в сеть постоянного тока через рубильник QS1 и потенциометр RP1.

Для измерения частоты вращения двигателя М в установке применен тахогенератор BR с измерительным прибором «об/мин». Переключатель QS4 позволяет менять полярность напряжения на входе прибора «об/мин» при изменении направления вращения двигателя М. Для измерения тока в цепи якоря  $I_a$  служит амперметр PA3, а для измерения напряжения — вольтметр PV1. Оба прибора должны иметь двустороннюю шкалу, так как полярность ЭДС генератора G может меняться. Амперметры PA1 и PA2 предназначены для измерения токов возбуждения двигателя М и генератора G. Амперметр PA2 должен иметь двустороннюю шкалу.

Ознакомившись с лабораторной установкой, следует записать паспортные данные всех электрических машин установки: номинальную мощность  $P_{ном}$ , номинальное напряжение  $U_{ном}$ , номинальный ток  $I_{ном}$ , номинальную частоту вращения  $n_{ном}$ , а также для машин постоянного тока номинальные значения токов возбуждения двигателя  $I_{в.д. ном}$  и генератора  $I_{в.г. ном}$ .

**Пробный пуск установки.** Проверить положение всех рубильников, автомата и переключателей: они должны находиться в положении «Выключено». Затем включить QS2 и QS3 и поставить потенциометр RP2 в положение, соответствующее минимальному значению тока возбуждения генератора  $I_{в.г}$ , а реостат  $r_{рг}$  в положение, соответствующее номинальному значению тока возбуждения двигателя  $I_{в.д}$ . Включением автомата QF пускают в ход асинхронный электродвигатель AM и с помощью RP2 плавно, чтобы не вызвать резких бросков тока якоря  $I_a$ , увеличивают ток возбуждения генератора  $I_{в.г}$ , доведя его до номинального значения, соответствующего номинальному напряжению в цепи якоря двигателя М. Затем следует переключатель QS4 поставить в положение, при котором прибор «об/мин» даст показания частоты вращения.

Далее проверяют возможность регулирования частоты вращения двигателя М. С этой целью сначала несколько уменьшают напряжение  $U_a$  (с помощью RP2), наблюдая уменьшение частоты вращения двигателя М, затем восстанавливают номинальное значение этого напряжения и, уменьшив ток возбуждения  $I_{в.д}$  (посредством  $r_{рг}$ ), вызывают увеличение частоты вращения двигателя.

Затем проверяют возможность реверсирования двигателя. Для этого восстанавливают номинальное значение тока возбуждения  $I_{в.д}$  и с помощью RP2 уменьшают ток возбуждения  $I_{в.г}$  до нуля. Затем переводят переключатель QS3 в другое включенное положение, изменив этим полярность напряжения в цепи возбуждения генерато-

ра G. После остановки якоря двигателя М переключают QS4 и потенциометром  $R_{п2}$  увеличивают ток возбуждения до номинального значения.

### Порядок выполнения работы

**Снятие данных и построение механических характеристик.** Для получения данных *естественной* механической характеристики двигателя М при двигательном (основном) режиме его работы поступают следующим образом. Устанавливают в цепи якоря номинальное напряжение  $U_{а ном}$  и номинальный ток возбуждения  $I_{в.д. ном}$  и, не включая электромагнитного тормоза ЭМТ, делают первый отсчет по приборам, соответствующий режиму холостого хода двигателя М. Затем, замкнув рубильник QS1, включают электромагнитный тормоз ЭМТ и потенциометром RP1 постепенно увеличивают нагрузочный момент на валу двигателя М до величины  $M_{2 ном}$ , при которой ток якоря двигателя становится номинальным. При этом напряжение в цепи якоря следует поддерживать номинальным. Делают четыре-пять замеров через приблизительно одинаковые интервалы момента  $M_2$  и показания приборов заносят в табл. 29.1. В таком же порядке снимают данные *искусственных* механических характеристик  $n = f(M_2)$  при напряжении в цепи якоря  $0,9 U_{ном}$  и  $0,75 U_{ном}$  при номинальном токе возбуждения двигателя М.

Затем снимают данные искусственных механических характеристик при токах возбуждения двигателя М:  $0,9 I_{в.д. ном}$  и  $0,75 I_{в.д. ном}$  при номинальном напряжении в цепи якоря двигателя М. Для каждой характеристики снимают по четыре-пять показаний приборов и заносят их в табл. 29.1. По данным этой таблицы строят пять механических характеристик двигателя М в одних осях координат.

**Кратность регулирования частоты вращения.** Кратность регулирования частоты вращения двигателя М при уменьшении напряжения в цепи якоря  $U_a$  определяют следующим образом. Создав посредством реостата  $r_{рг}$  номинальный ток возбуждения  $I_{в.д. ном}$  и включив ЭМТ, устанавливают номинальный нагрузочный момент на валу двигателя  $M_{2 ном}$  при номинальной частоте вращения  $n_{ном}$ .

Таблица 29.1

Номер измерения	$U_a$ , В	$I_{в.д}$ , А	$I_{в.г}$ , А	$I_{ш}$ , А	$n$ , об/мин	$M_2$ , Н·м
1						
2						
3						
4						
5						

Затем постепенно уменьшают напряжение  $U_a$  до значения, при котором якорь двигателя еще вращается равномерно при номинальном нагрузочном моменте на его валу  $M_{2\text{ном}}$ . В этих условиях измеряют минимальную частоту вращения  $n_{\text{мин}}$ , а затем определяют кратность регулирования  $D_1 = n_{\text{ном}}/n_{\text{мин}}$ .

Восстанавливают номинальное напряжение на выводах цепи якоря двигателя М при нагрузочном моменте  $M_{2\text{ном}}$  и постепенно уменьшают ток возбуждения  $I_{в.д}$  до значения, соответствующего наибольшей частоте вращения якоря двигателя М (но не более допустимого)  $n_{\text{макс}}$ . При этом нагрузочный момент на валу двигателя должен иметь значение, при котором ток в цепи якоря становится номинальным  $I_{а\text{ном}}$ . Кратность регулирования для этого случая  $D_2 = n_{\text{макс}}/n_{\text{ном}}$ . Общая кратность регулирования частоты вращения

$$D = D_1 D_2 = n_{\text{макс}}/n_{\text{мин}}$$

### **Анализ результатов лабораторной работы**

Анализируя результаты лабораторной работы, необходимо сделать вывод о соответствии полученных механических характеристик двигателя основным положением теории о механических характеристиках двигателя постоянного тока независимого возбуждения в системе Г–Д. При этом следует иметь в виду прямолинейность и параллельность этих характеристик. Если полученные в результате опыта механические характеристики значительно отличаются от прямых линий, то указывают возможные причины, вызвавшие это отличие, а также поясняют причины непараллельности механических характеристик (если это имеет место).

Далее делают вывод о кратности регулирования частоты вращения двигателя в режимах регулирования при изменениях напряжения в цепи якоря и тока возбуждения.

### **Контрольные вопросы**

1. Что собой представляет система Г–Д?
2. Какие способы регулирования частоты вращения возможны при работе двигателя постоянного тока независимого возбуждения в системе Г–Д?
3. Каковы достоинства и недостатки системы Г–Д?
4. Как будет изменяться частота вращения двигателя в системе Г–Д при уменьшении тока возбуждения генератора?
5. Почему механические характеристики двигателя М в системе Г–Д почти прямолинейны и параллельны?
6. Как изменить направление вращения якоря двигателя в системе Г–Д?
7. Изменится ли направление вращения якоря двигателя, если поменять полярность напряжения в сети постоянного тока, питающей цепь возбуждения двигателя М и генератора G?
8. Изменится ли жесткость механических характеристик двигателя в системе Г–Д, если в цепь якорей этих машин ввести добавочный резистор?



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 30

### Исследование свойств системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель»

**Цель работы.** Приобрести практические навыки в исследовании свойств системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель»; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о работе системы.

#### Программа работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, записать паспортные данные устройств и измерительных приборов, используемых в лабораторной установке.

2. Выполнить пробный пуск установки, проверить возможность регулировки частоты вращения двигателя при изменениях частоты тока на выходе ПЧ.

3. Снять данные для построения механической характеристики асинхронного двигателя при его питании непосредственно от сети (без ПЧ).

4. Снять данные для построения механических характеристик двигателя при его питании от ПЧ при частотах переменного тока: 50, 40, 30 и 20 Гц.

5. Построить механические характеристики асинхронного двигателя по данным п. 3 и 4 в одних осях координат.

6. Сравнить значения КПД и коэффициента мощности двигателя и всей системы при питании двигателя непосредственно от сети и от ПЧ при разных частотах переменного тока.

7. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

#### Основные понятия

Система «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ – АД) составляет основу современного электропривода переменного тока, так как обеспечивает электроприводу высокие технико-экономические параметры, надежность, простоту монтажа, наладки и обслуживания.

При изменении частоты тока  $f_1$  меняется синхронная частота вращения поля статора ( $n_1 = f_1 60 / p$ ), а следовательно, и частота вращения ротора  $n_2$ .

Из выражения максимального момента асинхронного двигателя

$$M_{\max} \approx c U_1^2 / f_1^2$$

следует, что с изменением частоты питающего напряжения  $f_1$  меняется величина максимального момента двигателя, а следовательно,

и его перегрузочная способность  $\lambda_m = M_{\max}/M_{\text{ном}}$ . Поэтому, чтобы сохранить перегрузочную способность двигателя на требуемом уровне, необходимо одновременно с изменением частоты тока  $f_1$  менять напряжение  $U_1$ , подводимое к обмотке статора. Характер одновременного изменения  $f_1$  и  $U_1$  зависит от формы графика изменения статического момента нагрузки в конкретном электроприводе. Если статический момент  $M_c$  активный, т. е. его величина неизменна и частота вращения в электроприводе регулируется при соблюдении условия *постоянства момента*:

$$M_2 = 9,55P/n_2 = \text{const},$$

то подводимое к двигателю напряжение необходимо изменять пропорционально изменению частоты:

$$U_1 \approx U_{1\text{ном}}(f_1/f_{1\text{ном}}), \quad (30.1)$$

где  $U_{1\text{ном}}$  и  $f_{1\text{ном}}$  — номинальные значения напряжения и частоты тока, подводимые к обмотке статора АД;  $U_1$  и  $f_1$  — фактические значения напряжения и частоты тока.

Из (30.1) следует, что при условии постоянства электромагнитного момента напряжение  $U_1$ , подводимое к обмотке статора, должно регулироваться пропорционально изменению частоты  $f_1$ , т. е.

$$U_1 / f_1 = \text{const}. \quad (30.1a)$$

Форма механических характеристик АД для этого случая показана на рис. 30.1, а: во всем диапазоне нагрузок рабочие участки характеристик остаются жесткими, а перегрузочная способность сохраняется неизменной. Исключение составляет регулирование частоты вращения вверх от номинальной при увеличении частоты  $f_1$  выше номинальной. Предполагаемое при этом возрастание напряжения  $U_1$  сверх номинального значения недопустимо по условиям эксплуатации двигателей. В этом случае увеличение частоты тока

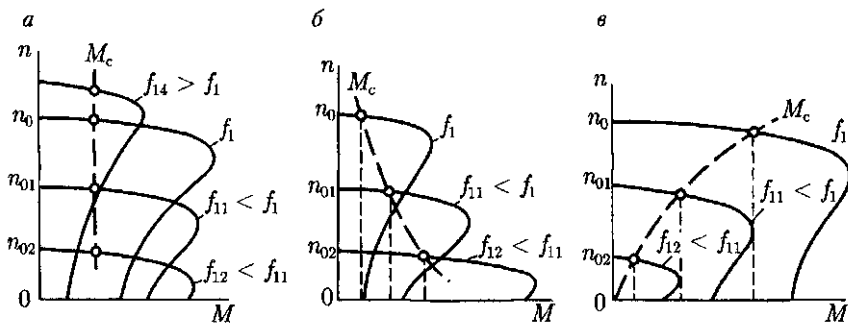


Рис. 30.1. Механические характеристики асинхронного двигателя при условиях постоянства момента (а), постоянства мощности (б) и вентиляторной нагрузки (в)

не сопровождаются увеличением напряжения и его оставляют равным номинальному значению. При этом частота вращения увеличивается, а максимальный момент  $M_{\max}$  и перегрузочная способность двигателя уменьшаются. Этому режиму на рис. 30.1, а соответствует механическая характеристика при частоте тока  $f_{14} > f_1$ .

Потребляемая двигателем мощность изменяется *пропорционально* изменению частоты вращения двигателя  $n_2$ .

Если же график статического момента нагрузки  $M_c$  имеет вид, показанный на рис. 30.1, б, и регулирование частоты вращения электропривода происходит при условии неизменной мощности двигателя, то соблюдается условие *постоянства мощности*, т. е.

$$P = 0,105 M n_2 = \text{const}, \quad (30.2)$$

и подводимое напряжение следует изменять в соответствии с выражением

$$U_1 \approx U_{1\text{ном}} \sqrt{f_1 / f_{1\text{ном}}}, \quad (30.3)$$

т. е.

$$U_1 / \sqrt{f_1} = \text{const}. \quad (30.4)$$

Механические характеристики АД для условия постоянства мощности представлены на рис. 30.1, б. Электромагнитный момент в этом случае изменяется *обратно пропорционально* частоте вращения:

$$M = 9,55 P / n_2. \quad (30.5)$$

В случае вентиляторного характера нагрузки, когда напряжение  $U_1$ , подводимое к обмотке статора, необходимо изменять пропорционально квадрату частоты переменного тока:

$$U_1^2 / f_1^2 = \text{const}. \quad (30.6)$$

Механические характеристики такого частотного регулирования представлены на рис. 30.1, в.

Наибольшее применение в электроприводах с частотным регулированием получили тиристорные преобразователи частоты ПЧ. Применяемые в настоящее время ПЧ, укомплектованные промежуточным звеном постоянного тока, достаточно совершенны и обеспечивают работу системы «ПЧ – АД» во всех четырех квадрантах осей координат, т. е. они допускают реализацию всех режимов работы и торможения электропривода.

Обычно такой ПЧ состоит из управляемого выпрямителя УВ и автономного инвертора АИ. Оба блока построены на тиристорах, для управления которыми используется система импульсно-фазового управления СИФУ (рис. 30.2). Управляющий сигнал  $U_y$  поступает на вход СИФУ из системы автоматического управления (САУ). Этот сигнал несет информацию о значении напряжения  $U_1$  и частоты  $f_1$ , которые необходимо подать на обмотку статора двигателя, чтобы обеспечить требуемый режим работы электропривода.

На выходе СИФУ формируются сигналы  $U_V$  и  $U_f$ . Сигнал  $U_V$  подается на вход управляемого выпрямителя УВ и определяет значение напряжения постоянного тока  $U_d$ , которое подается на вход автономного инвертора АИ, чтобы на выходе ПЧ обеспечить требуемое значение напряжения  $U_1$ . Сигнал  $U_f$  поступает на вход инвертора АИ и определяет необходимое значение частоты переменного тока  $f_1$  на выходе ПЧ. Частотные преобразователи с управляемым выпрямителем в качестве промежуточного звена обеспечивают широкий диапазон регулирования частоты и напряжения переменного тока.

Для получения на выходе ПЧ трехфазного синусоидального напряжения в инверторе АИ применяется модуляция импульсов. Существует два вида модуляции: *широтно-импульсная (ШИМ)* и *частотно-импульсная (ЧИМ)*. Однако ни один из способов модуляции не избавляет преобразователь частоты от его главного недостатка — несинусоидальности выходного напряжения. В результате помимо основной гармоники с частотой  $f_1$  выходное напряжение содержит высшие гармоники нечетного порядка: третью гармонику частотой  $3f_1$ , пятую гармонику частотой  $5f_1$  и т. д.

Высшие гармоники напряжения являются причиной возникновения в двигателе перенапряжений, дополнительных потерь, тормозящих (паразитных) моментов, что в конечном счете ведет к ухудшению эксплуатационных свойств двигателя и вызывает его чрезмерный перегрев. Применение сглаживающих фильтров на выходе ПЧ дает некоторое снижение несинусоидальности напряжения, но полностью не избавляет от нее. Но несмотря на этот недостаток, применение ПЧ в электроприводе является прогрессивной мерой, улучшающей технико-экономические свойства регулируемого электропривода. Тиристорные преобразователи частоты обеспечивают плавное изменение частоты вращения АД как в сторону повышения, так и понижения от номинального значения. Однако при изменении частоты переменного тока в сторону увеличения относительно номинального значения напряжение, подводимое к обмотке статора, не должно превышать номинального значения, т. е. регулирование частоты вращения двигателя ведется только изменением частоты переменного тока.

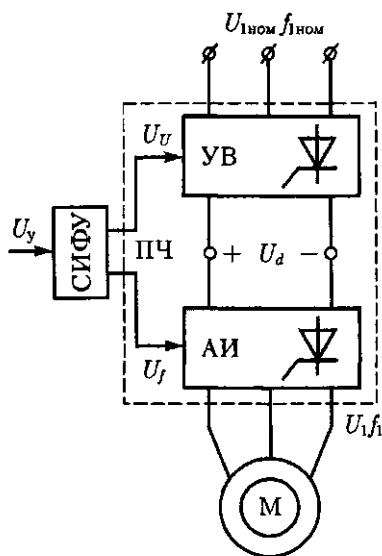


Рис. 30.2. Функциональная схема преобразователя частоты

Помимо ПЧ, состоящего из управляемого выпрямителя и автономного инвертора, промышленностью изготавливаются преобразователи без управляемого выпрямителя, обозначаемые НПЧ — преобразователи частоты с непосредственной связью. Преобразователи НПЧ проще и дешевле ПЧ, но несинусоидальность выходного напряжения НПЧ весьма значительна, что становится причиной, ограничивающей их применение. Кроме того, НПЧ не позволяют получить на выходе достаточно широкого диапазона изменения частоты.

### Лабораторная установка

Лабораторная установка для исследования системы ПЧ — АД (рис. 30.3) состоит из трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором М1 и тиристорного преобразователя частоты ПЧ. Частота переменного тока  $f_1$  на выходе ПЧ в процессе ее регулирования находится в определенной функциональной зависимости

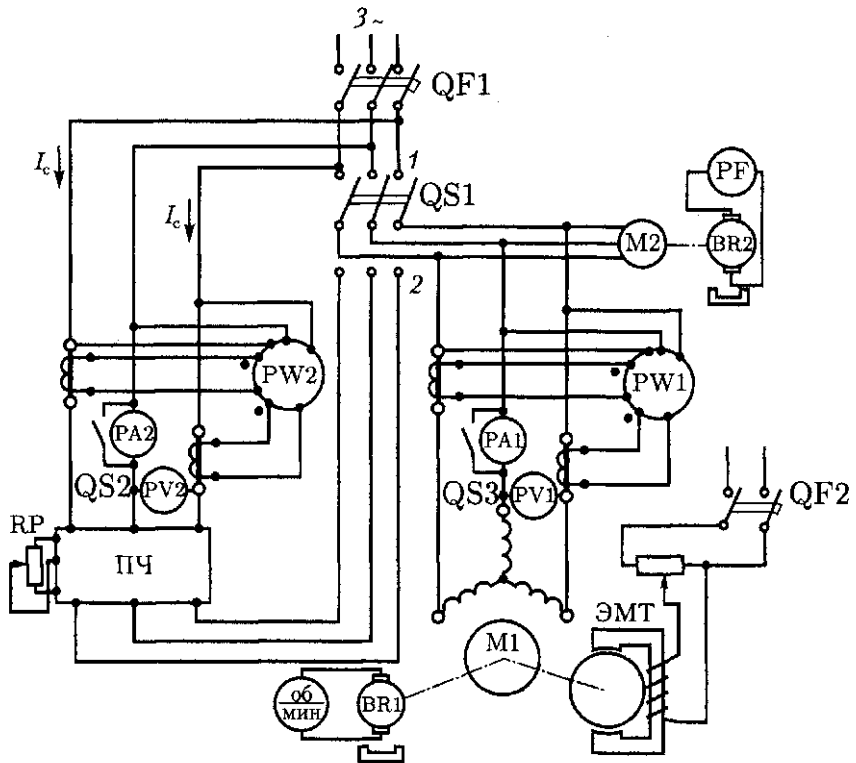


Рис. 30.3. Лабораторная установка для исследования системы «преобразователь частоты — асинхронный двигатель»

ти с напряжением  $U_1$  на выходе ПЧ [см. (30.1а), (30.4), (30.6)]. Регулирование частоты в установке осуществляется вручную посредством потенциометра РР. С помощью переключателя QS1 двигатель М может быть включен либо в трехфазную сеть (положение 1), либо на выход ПЧ (положение 2). Для измерения частоты вращения ротора двигателя в установке использован тахогенератор BR1 с измерительным прибором «об/мин». Для измерения напряжения, тока и мощности в установке применены два комплекта измерительных приборов. Один комплект, содержащий вольтметр PV1, амперметр PA1 и двухэлементный ваттметр PW1 с трансформаторами тока, включен в цепь статора двигателя, а другой комплект аналогичных приборов (PV2, PA2, PW2) включен на входе ПЧ. Оба комплекта должны быть однотипными, класса точности не ниже 1,0. Амперметры PA1 и PA2 снабжены ключами QS2 и QS3, с помощью которых эти приборы можно зашунтировать на время пуска двигателя, предохранив их от разрушения пусковым током.

Для контроля за частотой переменного тока  $f_1$ , поступающего на обмотку статора двигателя М1, целесообразно применение трехфазного синхронного реактивного микродвигателя М2, вал которого механически соединен с валом тахогенератора BR2. Например, для этого можно использовать двигатель серии ДРС. Частота вращения этого двигателя  $n_1 = (f_1 60)/p$  точно следует за изменениями частоты  $f_1$  основной гармоники переменного напряжения на выходе ПЧ. Так же меняется ЭДС на выходе тахогенератора BR2. Шкала вольтметра, подключенного к тахогенератору, переградуирована в единицы измерения частоты (Гц), т.е. этот прибор используется в качестве частотомера РР.

Нагрузка на вал двигателя М2 создается электромагнитным тормозом ЭМТ, обмотка которого включается в сеть постоянного тока через потенциометр и автомат QF2. Ознакомившись с лабораторной установкой и записав паспортные данные всех вошедших в нее устройств, следует автоматы QF1 и QF2 и переключатель QS1 поставить в положение «выключено», а ключи QS2 и QS3 замкнуть. После этого, получив разрешение преподавателя, произвести пробный пуск установки и проверить возможность нагрузки и регулирования частоты вращения двигателя.

### Порядок выполнения работы

**Снятие данных для построения механических характеристик двигателя.** Поставив переключатель QS1 в положение 1, включают автомат QF1. При этом двигатель М1 оказывается подключенным непосредственно в сеть. Затем размыкают ключ QS2 и автоматом QF2 включают ЭМТ, предварительно поставив потенциометр в крайнее правое положение. Перемещая движок этого потенциометра влево, увеличивают нагрузку на вал двигателя, пока ток в цепи

Таблица 30.1

Номер измерения	$f_1$ , Гц	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$n_2$ , об/мин	$M_2$ , Н·м	$P_2$ , Вт	$P'_1$ , дел	$P_1$ , Вт	$\cos \varphi_1$	$\eta$

статора (амперметр РА1) не достигнет номинального значения. Записав показания приборов, постепенно снижают нагрузку двигателя вплоть до холостого хода. При этом через приблизительно одинаковые интервалы тока  $I_1$  снимают пять-шесть показаний комплекта приборов № 1 в цепи двигателя М1 и заносят их в табл. 30.1.

Затем выполняют расчеты:

подводимая к двигателю мощность (Вт)

$$P_1 = P'_1 k_T C_W; \quad (30.7)$$

где  $k_T$  — коэффициент трансформатора тока;  $C_W$  — цена деления ваттметра, Вт/дел;

полезная мощность двигателя — мощность на валу (Вт)

$$P_2 = 0,105 M_2 n_2, \quad (30.8)$$

где  $M_2$  — нагрузочный момент, Н·м;  $n_2$  — частота вращения ротора, об/мин;

КПД двигателя

$$\eta = (P_2/P_1)100; \quad (30.9)$$

коэффициент мощности

$$\cos \varphi_1 = P_1 / (\sqrt{3} U_1 I_1). \quad (30.10)$$

Затем отключают автоматы QF1 и QF2, переводят переключатель QS1 в положение 2 и приступают к снятию данных механических характеристик двигателя при его питании от ПЧ.

Включают автомат QF1. Устанавливают на выходе ПЧ частоту тока 50 Гц и, создав посредством ЭМТ номинальную нагрузку на двигатель, постепенно ее снижают до холостого хода. Пять показаний приборов комплектов № 1 и № 2 заносят в табл. 30.2. Опыт повторяют при частотах тока на выходе ПЧ 40, 30 и 20 Гц. Сделав необходимые расчеты по формулам (30.7) — (30.10), заносят их результаты в табл. 30.3. Здесь  $U_c$ ,  $I_c$ ,  $P_c$ ,  $\cos \varphi_c$  и  $\eta_c$  — относятся к пара-

Таблица 30.2

Номер измерения	$f_1$ , Гц	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$n_2$ , об/мин	$M_2$ , Н·м	$P'_1$ , дел	$U_c$ , В	$I_c$ , А	$P'_c$ , Вт

Таблица 30.3

Номер измерения	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$\cos j_1$	$\cos j_2$	$h_1$ , %	$h_2$ , %

метрам сети на входе ПЧ (комплект приборов № 2). Опыт повторяют при частотах 40, 30 и 20 Гц.

По данным табл. 30.1, 30.2 и 30.3 в одних осях координат строят механические характеристики асинхронного двигателя в его основном режиме для всех выполненных опытов.

### Анализ результатов лабораторной работы

1. Проанализировать построенные механические характеристики с точки зрения соответствия их теоретическим сведениям о свойствах системы ПЧ – АД: прямолинейность и параллельность механических характеристик при разных частотах тока в цепи статора асинхронного двигателя. При этом следует иметь в виду, что некоторый разброс точек при построении характеристик неизбежен и является следствием погрешности измерений при выполнении опытов. Указать, какая кратность регулирования частоты вращения двигателя была получена при исследовании лабораторной установки.

2. Указать, какая функциональная связь между частотой тока и напряжением на выходе ПЧ применена в лабораторной установке и для какого вида нагрузки.

3. Сравнить энергетические показатели системы: потребляемую мощность, коэффициент мощности и КПД при питании двигателя М1 непосредственно от сети и при питании двигателя от ПЧ при частоте тока 50 Гц. При обнаружении различия в значениях этих параметров необходимо объяснить причину этого явления.

4. Сравнить перечисленные в п. 3 энергетические показатели при работе двигателя М1 от ПЧ при разной частоте переменного тока. Объяснить, в чем причина их различия.

5. Обобщая результаты выполненного экспериментального исследования, перечислить основные достоинства и недостатки системы ПЧ – АД по сравнению с системой Г – Д с двигателем постоянного тока независимого возбуждения.

### Контрольные вопросы

1. Какие способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей применяются в электроприводах?

2. Почему при регулировании частоты вращения изменением частоты переменного тока необходимо одновременно изменять напряжение?



3. Объясните принцип работы тиристорного преобразователя частоты с управляемым выпрямителем и автономным инвертором.

4. Почему напряжение на выходе ПЧ несинусоидально и каково влияние этого явления на работу системы ПЧ – АД?

5. Какая функциональная связь между частотой тока и напряжением применена в исследованной лабораторной установке и для какого вида нагрузки электропривода?

6. Чем ограничивается регулирование частоты переменного тока выше номинальной?

## Глава 6

### УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПРИВОДАМИ

#### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 31

#### **Исследование схемы нереверсивного автоматического управления пуском в функции времени и динамическим торможением двигателя постоянного тока параллельного возбуждения**

**Цель работы.** Практически изучить схему нереверсивного автоматического управления пуском в функции времени и динамическим торможением двигателя постоянного тока параллельного возбуждения и приобрести навыки в сборке и регулировке электропривода, выполненного по этой схеме.

#### **Программа работы**

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, записать паспортные данные двигателя и релейно-контакторных аппаратов.

2. Собрать схему управления по рис. 31.2 и после проверки ее преподавателем настроить время срабатывания реле ускорения КТ1 и КТ2.

3. Произвести пуск установки и измерить параметры, характеризующие пуск и остановку двигателя.

4. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

#### **Подготовка к работе**

1. Повторить теоретический материал: принципы релейно-контакторного управления электроприводами постоянного тока; схемы управления двигателями постоянного тока; способы управления пуском двигателей постоянного тока в функциях скорости, тока

и времени; схемы управления реверсивные и нереверсивные; управление торможением двигателей постоянного тока.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицу для занесения результатов измерений.

### Основные понятия

Управление электроприводом включает в себя операции: пуск, остановку, торможение, реверсирование, регулировку или поддержание неизменными частоты вращения, момента, мощности и других рабочих параметров электропривода. При этом должны учитываться случайно возникшие воздействия на электропривод, способные нарушить точность технологической операции, выполняемой рабочей машиной (механизмом).

В зависимости от способа выполнения операций управления электроприводы разделяют на два вида: ручной и автоматический.

В ручном электроприводе все операции управления выполняются человеком посредством аппаратов ручного управления: рубильников, выключателей, кнопок, контроллеров, пусковых и регулировочных реостатов и т.п.

В автоматическом электроприводе участие человека сводится к надзору за системой управления на случай возникновения в ней аварийных ситуаций; что же касается операций управления ЭП, то все они выполняются без участия человека.

Автоматические системы электропривода разделяются на разомкнутые и замкнутые.

В разомкнутой системе управления имеется *прямая цепь воздействий*, по которой осуществляется управление электроприводом в соответствии с поступившим на вход этой цепи управляющим сигналом  $U_y$  (рис. 31.1). Работа двигателя М и других устройств электропривода происходит исключительно в соответствии с этим сигналом. Никакой информации о фактических значениях параметров в разомкнутой системе электропривода нет, а следовательно, и нет корректировки работы системы. Например, управляющим сигналом предусмотрена номинальная частота вращения вала двигателя. Однако из-за происшедшего падения напряжения в питающей сети по непредвиденным причинам частота вращения оказалась меньше номинальной. Вследствие этого фактическое положение исполнительного органа (ИО) не будет соответствовать заданному положению, предусмотренному управляющим сигналом. Отсутствие корректи-



Рис. 31.1. Блок-схема разомкнутой системы автоматического электропривода

рующих мер может нарушить технологический процесс рабочей машины (механизма) данного электропривода.

В *замкнутой* автоматической системе электропривода имеются цепи обратных связей, соединяющих выход системы электропривода с его входом. Информация о фактическом значении параметров по этим цепям передается на вход системы и корректирует соответствующим образом управляющий сигнал.

Рассматриваемая лабораторная работа предусматривает исследование разомкнутой схемы автоматического управления, выполненной на релейно-контакторных элементах. Применение подобных схем в автоматическом электроприводе благодаря своей простоте и невысокой стоимости составляющих ее элементов пока является наиболее распространенным, хотя и не всегда обеспечивает требуемую надежность. Последнее зависит от качества изготовления релейно-контакторных устройств и правильного их выбора. Вместе с тем схемы с релейно-контакторными элементами проще для анализа примененных в них взаимодействий и блокировок, что имеет значение при изучении схем электропривода.

Все операции, связанные с включением и отключением различных элементов в рассматриваемых схемах, выполняются автоматически, т.е. без участия человека, кроме команды «Пуск» и «Стоп». Поэтому эти схемы более правильно следовало бы считать *полуавтоматическими*. Однако любая из этих схем, будучи включенной в систему автоматического управления (САУ), становится *автоматической*, так как все команды по управлению, включая «Пуск» и «Стоп», будут выполняться в такой системе автоматически в соответствии с управляющими электрическими сигналами.

Рассматриваемые в данной главе схемы выполнены с применением условных обозначений на элементы и буквенных кодов, согласно действующему стандарту (см. прил. 1 и 2).

### Лабораторная установка

Схема лабораторной установки нереверсивного управления пуском двигателя постоянного тока параллельного возбуждения в функции времени и динамическим торможением при отключении представлена на рис. 31.2. Схема состоит из двух электрически не соединенных частей: силовой и управляющей. Такое раздельное питание этих частей схемы электропривода позволяет в управляющей части применить низкое напряжение (24 — 48 В), что повышает безопасность обслуживания схемы электропривода (наладка, регулировка). Если же силовая часть схемы рассчитана на напряжение более 220 В, то раздельное питание управляющей части схемы обязательно.

*Силовая часть схемы* включает двигатель (цепь якоря и цепь возбуждения), пусковой резистор с двумя элементами ( $R_1$  и  $R_2$ ), резистор динамического торможения  $R_T$  и контакты реле и контакто-

ров, осуществляющие подключение всей силовой части к питающей сети и включения ее элементов.

Управляющая часть схемы состоит из контактов, кнопок управления, катушек реле и контакторов, осуществляющих управление двигателем М при его пуске и отключении по определенной программе.

Пуск двигателя М в функции времени осуществляется с помощью реле времени КТ1 и КТ2. При кратковременном нажатии кнопки SB1 «Пуск» замыкается цепь питания обмотки контактора КМ1, при срабатывании которого замыкаются блок-контакты КМ1, шунтирующие кнопку SB1, размыкаются контакты в цепи резистора  $R_T$ ,

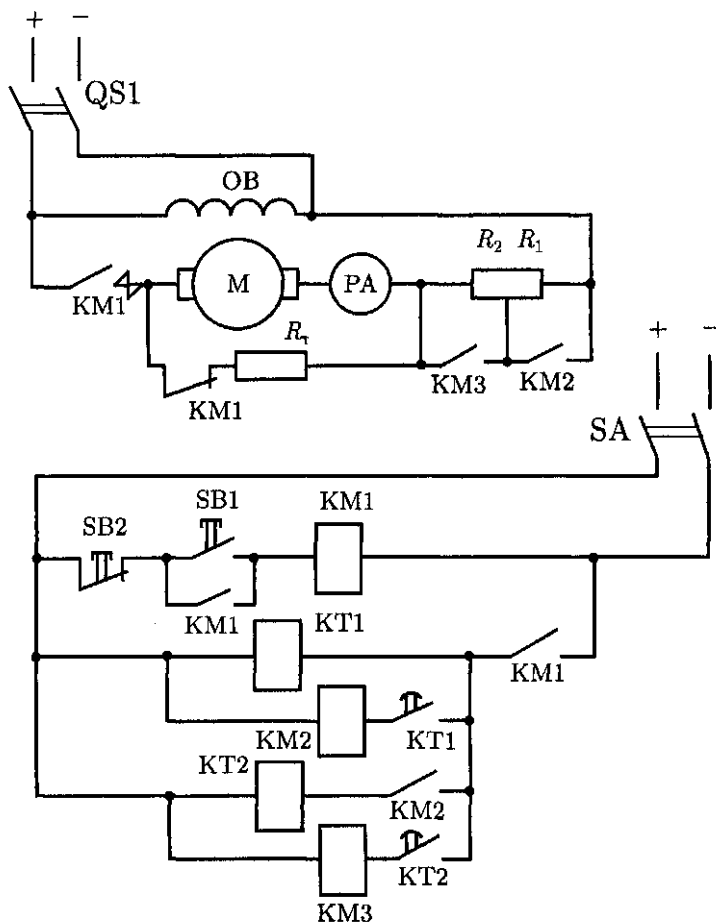


Рис. 31.2. Схема неперевосимого автоматического управления пуском в функции времени и динамическим торможением двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

замыкаются контакты, включающие реле КТ1, и замыкаются силовые контакты КМ1, подключающие двигатель М к сети постоянного тока. При этом начинается пуск двигателя, в цепь обмотки якоря которого включены элементы пускового резистора  $R_1 + R_2$  (первая ступень пуска).

Реле времени КТ1 с выдержкой времени замедления при срабатывании своими контактами замыкает цепь катушки контактора КМ2, при срабатывании которого контакты КМ2 шунтируют элемент пускового резистора  $R_1$ . В итоге разгон двигателя продолжается, но теперь на второй ступени пуска с сопротивлением добавочного резистора в цепи якоря  $R_2$ . Одновременно замыкаются контакты КМ2, подключающие катушку реле времени КТ2, которое срабатывает и с заданной выдержкой времени своими контактами подключает катушку контактора КМ3.

Контактор КМ3 срабатывает и своими контактами шунтирует элемент пускового резистора  $R_2$  и цепь якоря двигателя оказывается включенной на полное напряжение сети постоянного тока. На этом процесс пуска заканчивается и переходит в рабочий режим двигателя М. Таким образом, продолжительность пуска на первой ступени определяется временем замедления при срабатывании реле времени КТ1, а продолжительность пуска на второй ступени — временем замедления при срабатывании реле времени КТ2.

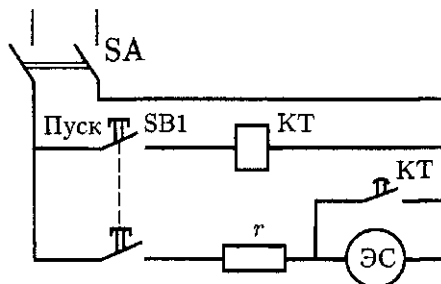
Для отключения двигателя необходимо кратковременно нажать кнопку SB2 «Стоп». При этом разомкнется цепь питания обмотки контактора КМ1, который своими контактами отключит якорь двигателя и цепи всех катушек реле и контакторов от сети. Следовательно, разомкнутся контакты КМ2 и КМ3, шунтирующие элементы пускового резистора, и двигатель будет подготовлен к следующему включению. Одновременно замкнутся контакты КМ1 в цепи резистора  $R_T$  и двигатель перейдет в режим динамического торможения, при котором кинетическая энергия вращающихся по инерции масс электропривода будет преобразовываться в теплоту и выделяться в резисторе  $R_T$  и сопротивлениях обмоток в цепи якоря двигателя.

Количество ступеней пуска двигателя может быть увеличено путем добавления необходимого числа ступеней сопротивления в пусковой резистор с соответствующим увеличением количества реле времени КТ и контакторов КМ.

### Порядок выполнения работы

**Настройка реле времени.** Настройку времени замедления при срабатывании реле времени КТ1 и КТ2 выполняют по заданному преподавателем времени замедления для каждого из этих реле. Для проверки установленного времени замедления можно воспользоваться секундомером часового типа, хотя более точные результаты

Рис. 31.3. Схема проверки времени замедления при срабатывании реле времени



получаются при применении электросекундомера. В этом случае реле времени КТ и электросекундомер ЭС включают по схеме, изображенной на рис. 31.3. При нажатии двоякнопки SB1 «Пуск» одновременно включаются реле времени КТ и электросекундомер ЭС, который сразу же начинает отсчет времени. При срабатывании КТ его замыкающие контакты с замедлением шунтируют обмотку электросекундомера ЭС, который оказывается отключенным. На шкале ЭС будет указано время замедления при срабатывании КТ. Для более точной настройки реле времени опыт повторяют 3 — 4 раза.

**Пуск и остановка двигателя.** После замыкания рубильников QS и SA (см. рис. 31.2), нажатия кнопки SB1 «Пуск» начинается процесс пуска двигателя в соответствии с заложенной в схеме управления программой. Пуск повторяют три раза, наблюдая за бросками пускового тока на каждой ступени пуска. Продолжительность пусковой операции измеряется секундомером, начиная с момента нажатия кнопки SB1 «Пуск» и кончая моментом уменьшения тока якоря до установившегося значения. Для проверки эффективности динамического торможения следует сначала отключить двигатель при разомкнутой цепи сопротивления  $R_T$  и секундомером измерить время от момента нажатия кнопки SB2 «Стоп» до полной остановки якоря (время свободного выбега), а затем замкнуть цепь резистора  $R_T$  и опыт повторить.

Все параметры, характеризующие пуск и остановку двигателя, измеряют три раза и показания приборов заносят в табл. 31.1. За-

Таблица 31.1

Номера замеров	Пуск			Остановка	
	Продолжительность пуска, с	Пусковой ток для двух ступеней, А		Продолжительность выбега, с	
		первой $R_1 + R_2$	второй $R_2$	без торможения	в режиме динамического торможения
1					
2					
3					
Средние значения					

тем определяют средние значения этих параметров как сумму трех измерений, деленную на три.

В выводах о результатах проделанной работы следует изложить свойства исследованной схемы автоматического управления электродвигателем постоянного тока и указать средние значения параметров, полученные опытным путем.

### **Контрольные вопросы**

1. В функции каких параметров возможен автоматический пуск двигателей постоянного тока?
2. В какой последовательности происходит срабатывание контакторов и реле в рассматриваемой схеме управления?
3. Как влияет изменение времени замедления при срабатывании реле времени на броски пускового тока в цепи якоря двигателя постоянного тока?
4. Зависит ли продолжительность пусковой операции в рассматриваемой схеме от нагрузки на вал двигателя?
5. Какой способ электрического торможения применен в рассматриваемой схеме управления двигателем постоянного тока?
6. Будет ли работать схема управления, если кнопку SB1 не шунтировать блок-контактами KM1?
7. Какие дополнения необходимо внести в рассматриваемую схему управления двигателем, чтобы его пуск происходил тремя ступенями?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 32**

### **Исследование схемы нереверсивного автоматического управления пуском в функции времени и динамическим торможением трехфазным асинхронным двигателем с фазным ротором**

**Цель работы.** Практически изучить схему автоматического управления пуском в функции времени и динамическим торможением трехфазным асинхронным двигателем с фазным ротором и приобрести навыки в сборке и регулировке этой схемы.

### **Программа работы**

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, записать паспортные данные двигателя и релейно-контакторных устройств.
2. Собрать схему по рис. 32.1 и после проверки ее преподавателем установить требуемое время замедления при срабатывании реле времени.
3. Произвести пуск лабораторной установки и измерить параметры, характеризующие пуск и остановку двигателя.
4. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

## Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал: принципы релейно-контакторного управления электроприводами переменного тока; схемы управления трехфазными асинхронными двигателями с фазным ротором; управление пуском и торможением трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором в функции времени; схемы включения пусковых резисторов.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицу для занесения результатов измерений.

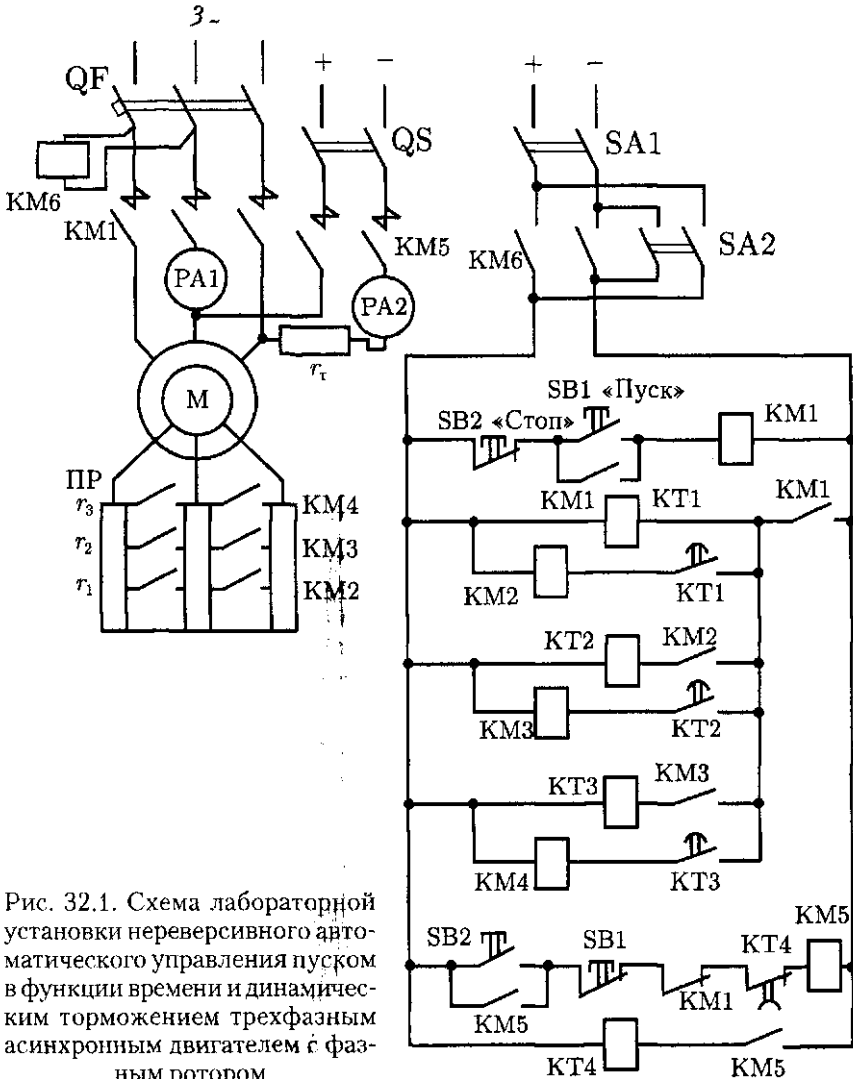


Рис. 32.1. Схема лабораторной установки неререверсивного автоматического управления пуском в функции времени и динамическим торможением трехфазным асинхронным двигателем с фазным ротором



## Лабораторная установка

Сведения, связанные с принципами автоматического управления электроприводами и типовыми схемами релейно-контакторного управления электроприводами, изложены в лабораторной работе № 30.

Лабораторная установка, выполненная по схеме рис. 32.1, обеспечивает автоматическое неререверсивное управление пуском и динамическое торможение трехфазным асинхронным двигателем с фазным ротором в функции времени. *Силовая часть схемы* включает в себя двигатель и пусковой реостат ПР, содержащий три резистора (по одному на фазу ротора), соединенные «звездой». Каждый из этих резисторов состоит из трех последовательно соединенных частей  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$ .

Напряжение из сети подводится через автомат QF, а подключение обмотки статора к сети происходит через силовые контакты линейного контактора КМ1. В один из линейных проводов включен амперметр РА1 для контроля за величиной пускового тока. Переключение ступеней пускового реостата осуществляется замыкающими контактами контакторов КМ2, КМ3 и КМ4. Для динамического торможения двигателя в силовой части схемы имеется электрическая цепь для подключения обмотки статора к источнику постоянного тока через резистор  $r_r$ . Подключение этой цепи к сети постоянного тока выполняется через рубильник QS и замыкающие контакты контактора торможения КМ5. Для контроля за величиной тока в цепи динамического торможения в указанной цепи имеется амперметр РА2.

*Управляющая часть схемы* электрически не связана с силовой частью и получает питание из сети постоянного тока через рубильник SA1. Управляющая часть схемы состоит из нескольких контакторов и реле, выполняющих управление пуском и торможением электродвигателя по заданной программе. Программа пуска (число ступеней пуска и время включения на каждой из них) определяется тремя реле времени и уставками на продолжительность задержания при срабатывании этих реле.

Управление динамическим торможением двигателя осуществляется контактором торможения КМ5 и реле времени КТ4, на котором задается продолжительность динамического торможения. Схема работает следующим образом. Предварительно необходимо включить автомат QF и рубильники QS и SA1. Рубильник SA2 должен быть разомкнут. При кратковременном нажатии сдвоенной кнопки SB1 «Пуск» замыкается цепь обмотки линейного контактора КМ1 и его блок-контакты шунтируют кнопку SB1 «Пуск», предотвращая размыкание этой цепи при отпущенной кнопке. Одновременно замыкаются силовые контакты КМ1, подключающие к сети обмотку статора двигателя М. При этом начинается пуск двигателя на первой ступени пускового реостата ПР, обладающей со-

противлением  $R_{\text{ПР1}} = r_1 + r_2 + r_3$ . Контакты линейного контактора КМ1 в цепи катушки контактора торможения КМ5 размыкаются, что предотвращает случайное включение контактора торможения КМ5, а контакты КМ1 включают катушку реле времени КТ1. При этом контакты КТ1 с установленным замедлением срабатывают и своими контактами замыкают цепь катушки контактора КМ2. При срабатывании этого контактора замыкаются контакты КМ2, шунтирующие элементы  $r_1$  пускового реостата ПР. При этом процесс пуска двигателя М переходит на следующую ступень  $R_{\text{ПРII}} = r_2 + r_3$ .

Срабатывание контактора КМ2 сопровождается также замыканием контактов, включающих катушку реле времени КТ2. С заданной выдержкой времени это реле замкнет свои контакты в цепи обмотки контактора КМ3, который своими контактами шунтирует элементы  $r_2$  пускового реостата ПР. В итоге двигатель перейдет на третью ступень пуска  $R_{\text{ПРИII}} = r_3$ . И наконец, контакты КМ3 включают реле времени КТ3, которое с установленной выдержкой времени сработает и своими контактами включит контактор КМ4. При этом пусковое сопротивление в цепи ротора окажется полностью шунтированным и обмотка ротора двигателя будет замкнута накоротко. На этом процесс пуска двигателя заканчивается и он начинает работать в режиме своей естественной механической характеристики.

Остановка электродвигателя осуществляется кратковременным нажатием сдвоенной кнопки SB2 «Стоп», что приводит к отключению линейного контактора КМ1. В результате размыкаются силовые контакты КМ1, отключающие обмотку статора двигателя от сети, и контакты, отключающие всю группу реле и контакторов, управляющих контактами в цепи пускового реостата ПР. Это приводит к размыканию всех контактов контакторов КМ2, КМ3 и КМ4, подготавливая двигатель к следующему пуску.

Одновременно нажатие кнопки SB2 «Стоп» и отключение линейного контактора КМ1 приводит к включению контактора торможения КМ5, который своими блок-контактами шунтирует контакты кнопки SB2 «Стоп» и включает реле времени КТ4. Силовые контакты КМ5 одновременно подключают к сети постоянного тока цепь динамического торможения с резистором  $r_t$ . В результате начинается динамическое торможение двигателя М. Но по истечении некоторого времени, определяемого уставкой замедления срабатывания на реле времени КТ4, это реле сработает и своими размыкающими контактами с замедлением при срабатывании разомкнет цепь контактора торможения КМ5. Это приведет к отключению реле времени КТ4, размыканию блок-контактов КМ5, шунтирующих кнопку SB2 «Стоп», и отключению цепи динамического торможения двигателя М.

Наличие нормально замкнутой кнопки SB1 цепи контактора торможения КМ5 исключает одновременное срабатывание контакто-

ров КМ5 и линейного контактора КМ1 при нажатии кнопки SB1, что привело бы к возникновению аварийного режима двигателя М.

В схеме применена блокировка, исключающая «самопуск» двигателя при случайном исчезновении и последующем возникновении напряжения на обмотке статора двигателя. Эта блокировка обеспечивается контактором блокировки КМ6, обмотка которого подключена к двум линейным проводам трехфазной сети, питающей цепь статора двигателя. Замыкающие контакты этого контактора КМ6 включены в цепь питания управляющего участка схемы. Таким образом, при случайном исчезновении напряжения в трехфазной сети, питающей двигатель, контактор КМ6 своими контактами отключает цепь управления, что приводит к отключению всех реле и контакторов. При возобновлении напряжения в трехфазной сети процесс пуска приходится начинать вновь включением кнопки SB1 «Пуск».

### Порядок выполнения работы

**Настройка времени срабатывания реле времени.** Настройку времени замедления при срабатывании реле времени КТ1, КТ2 и КТ3 выполняют с помощью электросекундомера ЭС, включенного по схеме, показанной на рис. 31.3. Настройку времени замедления реле динамического торможения КТ4 проводят по схеме рис. 32.2, где размыкающие контакты этого реле включены последовательно в цепь электросекундомера ЭС и при срабатывании КТ цепь ЭС размыкается.

**Пуск и остановка двигателя.** Для пуска двигателя М следует включить автомат QF и рубильники QS и SA1 (рубильник SA2 разомкнут) и кратковременно нажать двоянную кнопку SB1 «Пуск». Для остановки двигателя необходимо нажать двоянную кнопку SB2 «Стоп». Пуск электродвигателя повторить три раза, наблюдая за бросками пускового тока в цепи статора и временем включения цепи ротора на каждой ступени пуска.

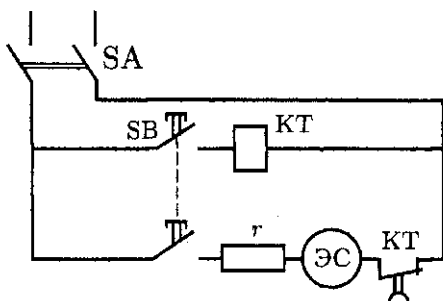


Рис. 32.2. Схема включения реле времени КТ и электросекундомера ЭС для настройки времени срабатывания

Эффективность динамического торможения проверяют сравнением продолжительности времени вращения ротора по инерции при разомкнутом рубильнике QS (время свободного выбега) с продолжительностью времени вращения ротора при замкнутом рубильнике QS. Измерение времени торможения начинают с момента нажатия на кнопку «Стоп» до момента полной остановки ротора.

Таблица 32.1

Номера замеров	Пуск			Остановка		
	Продолжительность пуска, с	Пусковой ток (А) для трех ступеней			Продолжительность выбега, с	
		первой $\tau_1 + \tau_2 + \tau_3$	второй $\tau_2 + \tau_3$	третьей $\tau_3$	без торможения	в режиме динамического торможения
1						
2						
3						
Средние значения						

Все параметры, характеризующие пуск и остановку двигателя, заносят в табл. 32.1, затем определяют их средние значения как сумму трех измерений, деленную на три.

В выводах о проделанной работе следует изложить свойства исследованной схемы автоматического управления, а также указать средние параметры, характеризующие процессы пуска и остановки двигателя.

#### **Контрольные вопросы**

1. Изложите последовательность срабатывания контакторов и реле при нажатии на кнопку SB1 «Пуск».
2. Будет ли работать схема управления, если кнопку SB1 «Пуск» не шунтировать контактами КМ1?
3. Каково назначение размыкающих контактов линейного контактора КМ1 в цепи контактора торможения КМ5?
4. Объясните назначение контактора КМ6 и рубильника SA2.
5. Какие изменения необходимо внести в схему управления, для того чтобы пуск двигателя происходил на четырех ступенях?

### **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 33**

#### **Исследование реверсивной схемы автоматического управления пуском и торможением противовключением трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором**

**Цель работы.** Практически изучить реверсивную схему автоматического управления пуском в функции скорости и торможением противовключением трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором и приобрести навыки в сборке этой схемы.

## Программа работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, записать паспортные данные двигателя и релейно-контакторных устройств.
2. Собрать схему по рис. 33.1 и после проверки ее преподавателем опробовать установку в работе и произвести наладку.
3. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

## Подготовка к работе

Повторить теоретический материал: типовые схемы управления трехфазными асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором; принцип реверсирования и торможения противовключением в функции скорости; устройство реле скорости.

## Лабораторная установка

Сведения о принципах автоматического управления электроприводами и типовыми схемами релейно-контакторного управления изложены в лабораторной работе № 30.

Исследуемая схема (рис. 33.1) обеспечивает реверсивное управление трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором с торможением противовключением в функции скорости.

Пуск двигателя осуществляется прямым включением в сеть без применения специальных способов понижения пускового тока. Торможение двигателя противовключением является наиболее эффективным способом. Особенность этого способа состоит в том, что для исключения реверсирования двигателя необходимо использовать специальный способ отключения двигателя при снижении частоты вращения до нулевого значения. Для этого в схеме управления применено реле скорости РС, обеспечивающее отключение двигателя от сети по окончании процесса торможения.

Силовая часть схемы состоит из двигателя М, обмотка статора которого включается в сеть через две группы силовых контактов: группа контактов КМ1(П), при замыкании которых ротор двигателя вращается в одном направлении (вправо), и группа контактов КМ2 (Л), при замыкании которых ротор двигателя вращается в противоположном направлении (влево). Эти же две группы контактов используют для торможения противовключением. Если одну из них применяют для работы двигателя, то другую для торможения противовключением. Кроме того, силовая часть схемы содержит реле скорости РС, механически соединенное с валом двигателя. Контакты этого реле включены в управляющую часть схемы.

Реле скорости РС работает аналогично асинхронному двигателю и устроено следующим образом. Постоянный магнит 1 (рис. 33.2), вал которого соединен с валом двигателя М, вращается внутри ко-

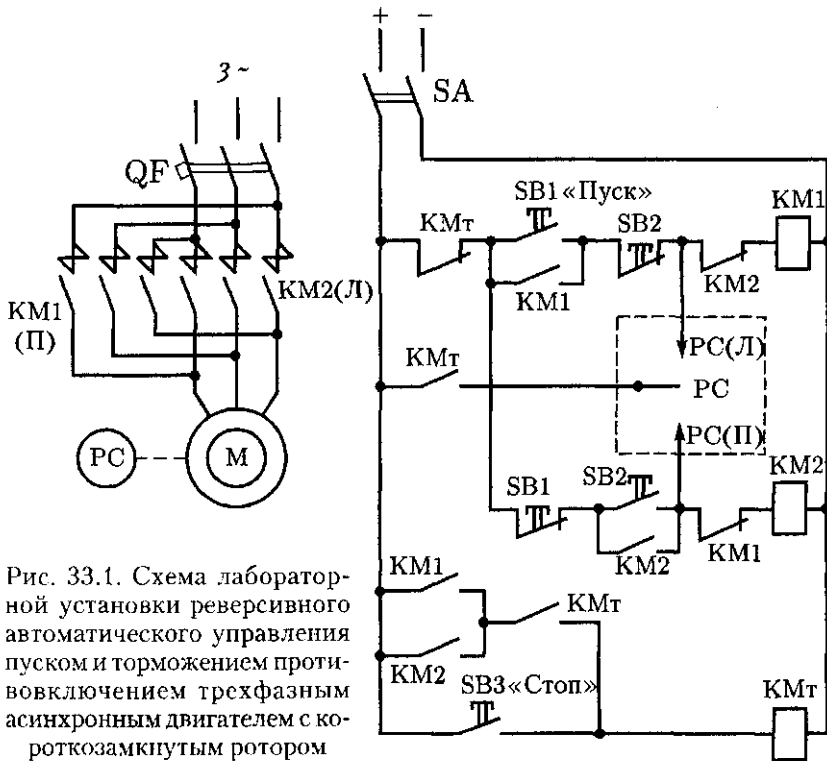


Рис. 33.1. Схема лабораторной установки реверсивного автоматического управления пуском и торможением противовключением трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором

роткозамкнутой клетки 2 («беличья клетка») и наводит в стержнях клетки токи. Эти токи взаимодействуют с вращающимся магнитным полем постоянного магнита и создают электромагнитный момент. Короткозамкнутая клетка под действием момента поворачивается и упором 6 воздействует на контакт 5 или 7, вызывая их замыкание с контактами 4 или 8 соответственно (в зависимости от направления вращения ротора двигателя).

При торможении двигателя частота вращения постоянного магнита уменьшается и при достижении ею значения, равного 5–10 % от номинальной частоты вращения, электромагнитный момент, действующий на упор 6 короткозамкнутой клетки, уменьшается до значения, при котором замкнутая пара контактов реле под действием пружины 3 или 9 размыкается и процесс торможения прекращается, что исключает возникновение реверса при торможении противовключением. Частоту вращения, при которой наступает размыкание контактов реле, можно регулировать растяжением пружин с помощью регулировочных винтов 3 или 9. На схеме управления двигателем (см. рис. 33.1) контактную группу реле скорости изображают в виде подвижного контакта РС и двух неподвижных контактов:

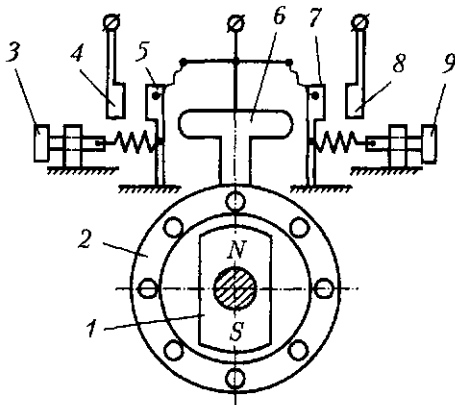


Рис. 33.2. Устройство реле скорости

РС(П) и РС(Л). При вращении ротора двигателя вправо подвижный контакт РС замыкается с неподвижным контактом РС(П), а при вращении ротора влево — с неподвижным контактом РС(Л).

Напряжение подается в силовую часть схемы путем включения автомата QF. Управляющая часть схемы вклю-

чается рубильником SA. Затем для включения двигателя на вращение вправо нажимают двоящую кнопку SB1 «Пуск». При этом замыкается цепь катушки линейного контактора КМ1 и одновременно размыкаются контакты в цепи катушки линейного контактора КМ2. Это исключает возможность случайного включения этого контактора, что привело бы к короткому замыканию в силовой части схемы двигателя. При срабатывании линейного контактора КМ1 замыкаются его контакты, шунтирующие кнопку SB1, и включаются силовые контакты КМ1(П), которые присоединяют обмотку статора двигателя к сети с порядком следования фаз на обмотке статора, соответствующим вращению ротора вправо. Замыкаются контакты КМ1 в цепи реле торможения КМт. После пуска двигателя М срабатывает реле скорости РС и его подвижный контакт РС замыкается с неподвижным контактом РС(П).

Для остановки двигателя нажимают кнопку SB3 «Стоп». При этом замыкаются контакты, подключающие катушку реле торможения КМт, при срабатывании которого размыкаются его контакты КМт в цепи катушки контактора КМ1 и двигатель отключается от сети, продолжая вращение по инерции. Одновременно замыкаются контакты КМт в цепи реле торможения КМт и контакты КМт в цепи подвижного контакта РС. Так как отключение контактора КМ1 вызвало замыкание контактов КМ1 в цепи катушки линейного контактора КМ2, он включается и замыкает силовые контакты КМ2(Л).

Возникший в двигателе вращающий момент левого вращения вызывает торможение двигателя противовключением. При уменьшении частоты вращения ротора двигателя до значения, составляющего 5—10% от номинального, вращающий момент на короткозамкнутой клетке реле скорости РС уменьшается настолько, что под действием пружины контакты РС — РС(П) размыкаются, катушка линейного контактора КМ2, получавшая питание через контакты реле скорости РС — РС(П), отключается, группа контактов КМ2(Л)

размыкается и процесс торможения прекращается. Это исключает возможность реверсирования двигателя при торможении противовключением. Настройку частоты вращения ротора двигателя, при которой размыкаются контакты реле скорости РС, выполняют регулировкой пружин реле посредством винтов 3 и 9 (см. рис. 33.2).

Если при работе двигателя М с правым вращением ротора потребуется его реверсирование, то нажимать кнопку SB3 «Стоп» не следует. Для этого достаточно нажать двоящую кнопку SB2. При этом размыкаются контакты в цепи катушки линейного контактора КМ1 и замыкаются контакты в цепи линейного контактора КМ2. В итоге разомкнутся силовые контакты КМ1(П) и замкнутся силовые контакты КМ2(Л), при этом изменится порядок следования фаз на обмотке статора и двигатель поменяет направление вращения ротора. Если после этого потребуется остановка двигателя, то необходимо нажать кнопку SB3 «Стоп», после чего наступит процесс торможения противовключением.

### **Порядок выполнения работы**

**Сборка и наладка схемы лабораторной установки.** Требуемая для сборки схемы аппаратура расположена на лабораторном стенде, при этом маркировка обмоток и контактов выполнена согласно принципиальной схеме. Силовая и управляющая части схемы имеют раздельное питание, что позволяет производить наладку управляющей части схемы без включения двигателя. После сборки и проверки схемы преподавателем ее опробуют в работе, проведя несколько раз пуск, реверс и остановку двигателя.

Для оценки эффективности торможения противовключением сначала измеряют секундомером время свободного выбега при отключении двигателя без торможения противовключением (с отключенным подвижным контактом РС реле скорости), а затем время торможения до полной остановки двигателя при торможении противовключением (включить в схему подвижный контакт РС реле скорости).

Отчет о проделанной работе должен содержать принципиальную схему управления и спецификацию релейно-контакторной аппаратуры. Здесь же делают вывод об эффективности работы схемы на этапах ее работы (пуск, реверс, торможение).

### **Контрольные вопросы**

1. Объясните работу схемы при пуске, реверсе и торможении двигателя.
2. Каковы устройство и назначение реле скорости?
3. Что изменится в работе схемы, если увеличить растяжение пружин в реле скорости?
4. Какие приняты в схеме управления меры, предотвращающие одновременное срабатывание линейных контакторов КМ1 и КМ2?



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 34

### Сборка узлов схем управления электрическими приводами на бесконтактной аппаратуре

**Цель работы.** Приобрести практические навыки по сборке и наладке схем управления электроприводами с применением бесконтактных элементов.

#### Программа работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, записать данные двигателей, магнитного усилителя и тиристора.
2. Собрать схему бесконтактного управления двигателем постоянного тока по рис. 34.4 и 34.5, после проверки их преподавателем опробовать установки в работе, затем снять данные и построить регулировочные характеристики электроприводов.
3. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

#### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал: принцип действия магнитного усилителя и тиристора; принцип бесконтактного управления двигателями постоянного и переменного токов; бесконтактное управление двухфазным асинхронным двигателем посредством магнитного усилителя и бесконтактное управление двигателем постоянного тока с применением управляемого тиристорного преобразователя.
2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

#### Основные понятия

Современный автоматизированный электропривод характеризуется применением бесконтактных управляющих устройств, т. е. таких устройств, в которых управление двигателем осуществляется без разрыва цепи основного (рабочего) тока. Напомним, что в рассмотренных ранее схемах электропривода с контактными управляющими устройствами управление работой двигателя осуществлялось замыканием или размыканием силовых контактов в цепи основного (рабочего) тока. Например, в цепи обмотки статора асинхронного двигателя или в цепи обмотки якоря двигателя постоянного тока.

Основные преимущества бесконтактных управляющих устройств по сравнению с контактными состоят в том, что срок службы бесконтактных устройств практически неограничен и к тому же они не нуждаются в уходе в процессе эксплуатации.

В данной работе рассматриваются два вида бесконтактных управляющих устройств: магнитный усилитель и тиристор — управляемый вентиляльный преобразователь.

**Магнитный усилитель** представляет собой статическое электромагнитное устройство, состоящее из магнитопровода и обмоток. На рис. 34.1, а показана конструкция простейшего магнитного усилителя, состоящая из магнитопровода, на стержнях которого расположены две обмотки: рабочая  $w_{\text{раб}}$  и управления  $w_y$ . Если последовательно к рабочей обмотке подключить нагрузку  $z_n$  и эту цепь включить в сеть переменного тока с напряжением  $U_1$ , то ток в этой цепи будет иметь небольшое значение

$$I_1 = U_1 / (z_n + z_{\text{раб}}), \quad (34.1)$$

так как будет ограничен значительным сопротивлением рабочей обмотки

$$z_{\text{раб}} \approx x_{\text{раб}} = 2\pi f_1 L_{\text{раб}}, \quad (34.2)$$

где  $f_1$  — частота тока в сети;  $L_{\text{раб}}$  — индуктивность рабочей обмотки усилителя.

Для обмотки с числом витков  $w_{\text{раб}}$  со стальным сердечником индуктивность

$$L_{\text{раб}} = \mu w_{\text{раб}}^2 S / l. \quad (34.3)$$

Число витков рабочей обмотки  $w_{\text{раб}}$ , площадь поперечного сечения сердечника  $S$  и его длина  $l$  являются конструктивными постоянными параметрами магнитного усилителя. Что же касается магнитной проницаемости материала магнитопровода  $\mu$ , то ее значение в большой степени зависит от напряженности подмагничивающего поля  $H$  (с ростом напряженности  $H$  магнитная проницаемость  $\mu$  уменьшается).

Как видно из (34.3), уменьшение  $\mu$  ведет к снижению индуктивности рабочей обмотки  $L_{\text{раб}}$ , т. е. к уменьшению ее индуктивного сопротивления (34.2), а следовательно, к увеличению тока  $I_1$  в нагрузке (34.1).

Требуемое значение напряженности поля  $H$  в магнитопроводе усилителя создается обмоткой управления  $w_y$ . Эта обмотка выпол-

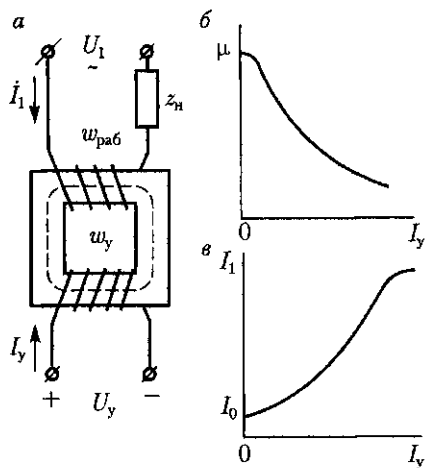


Рис. 34.1. Принцип работы магнитного усилителя

няется с большим числом витков  $w_y$ , поэтому даже небольшой ток управления  $I_y$  в этой обмотке создает значительную магнитодвижущую силу  $F_y = I_y w_y$ , вызывающую магнитное насыщение магнитопровода, а следовательно, уменьшение магнитной проницаемости  $\mu$  ферромагнитного материала магнитопровода (рис. 34.1, б).

Таким образом, в магнитном усилителе имеется возможность регулировать ток в рабочей обмотке  $I_1$  путем изменения тока управления  $I_y$  (рис. 34.1, в). При этом ток управления  $I_y$  намного меньше рабочего тока  $I_1$ , а мощность управления  $P_y$  намного меньше активной мощности в рабочей цепи магнитного усилителя  $P_1$ .

Обычно управление магнитным усилителем, т. е. его подмагничивание, осуществляется постоянным током.

Рассмотренный простейший магнитный усилитель на одном сердечнике не получил практического применения. Объясняется это тем, что за счет трансформаторной связи между обмотками усилителя в обмотке управления  $w_y$  наводится значительная переменная ЭДС. Большое значение этой ЭДС обусловлено тем, что число витков в обмотке управления обычно во много раз больше числа витков в рабочей обмотке, поэтому рассмотренная конструкция усилителя представляет собой повышающий трансформатор. Это обстоятельство практически исключает возможность управления усилителем путем изменения тока в его обмотке управления.

Практическое применение получили магнитные усилители на двух сердечниках. В таком магнитном усилителе рабочая обмотка (рис. 34.2, а) разделена на две равные части и каждая из них расположена на отдельном сердечнике так, чтобы МДС  $F_{\text{раб}/2}$  этих частей в стержнях магнитопровода, охваченных обмоткой управления  $w_y$ ,

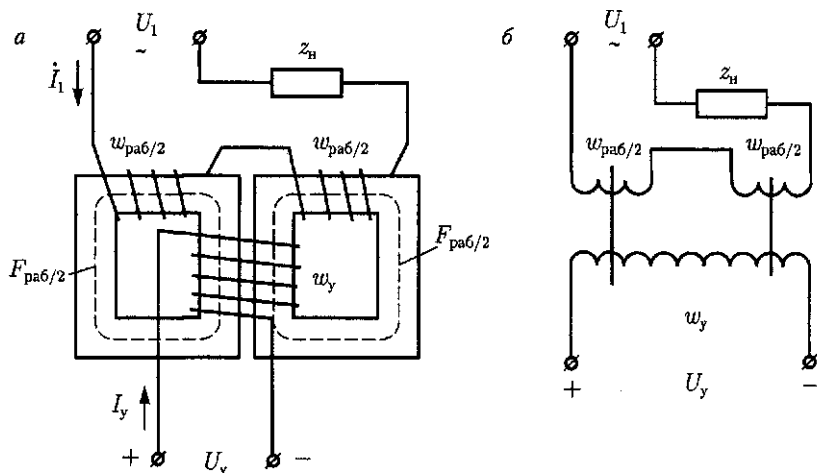


Рис. 34.2. Магнитный усилитель на двух сердечниках

были направлены встречно друг другу и их действие взаимно компенсировалось. На рис. 34.2, б показана принципиальная схема магнитного усилителя. Если нагрузкой магнитного усилителя является устройство постоянного тока, то его включают в цепь рабочей обмотки усилителя через выпрямитель.

Основными параметрами магнитного усилителя являются *коэффициенты усиления*:

коэффициент усиления по току

$$k_i = (I_{1ном} - I_0)/I_y; \quad (34.4)$$

коэффициент усиления по мощности

$$k_p = (P_{1ном} - P_0)/P_y, \quad (34.5)$$

где  $I_{1ном}$  и  $P_{1ном}$  — номинальные значения тока и активной мощности в рабочей цепи усилителя;  $I_0$  и  $P_0$  — ток и активная мощность холостого хода, соответствующие нулевому значению тока управления;  $I_y$  и  $P_y$  — ток и активная мощность в обмотке управления.

**Тиристоры**, или управляемые полупроводниковые диоды, — наиболее перспективные бесконтактные элементы современного электропривода. Основным элементом тиристора является кремниевая пластина, имеющая четырехслойную структуру. При этом слои с электронной  $n$ -проводимостью чередуются со слоями дырочной  $p$ -проводимостью (рис. 34.3). Эти четыре слоя образуют три перехода: П1, П2, П3. От среднего слоя  $p$  имеется вывод — управляющий электрод У. Если управляющий электрод не подключен, а между анодом А и катодом К диода приложено напряжение от источника постоянного тока  $U$  прямой полярности (плюс на аноде), то переходы П1 и П3 будут открыты, т. е. их сопротивление прямому току весьма мало. Что же касается перехода П2, то он включен в обратном направлении ( $n-p$ ), поэтому его электрическое сопротивление значительно и почти все напряжение  $U$  окажется приложенным к переходу П2. При этом величина тока через диод будет весьма незначительной ( $I \approx 0$ ).

Если же к управляющему электроду У и катоду К приложить напряжение управления  $U_y$  (плюс на управляющем электроде), то в переходе П3 возникнет ток управления  $I_y$  и появятся дополнительные носители зарядов. В итоге слой  $n-p$ -перехода П2 станет электропроводящим, т. е. тиристор откроется и под действием напряжения  $U$  через все слои тиристора будет проходить ос-

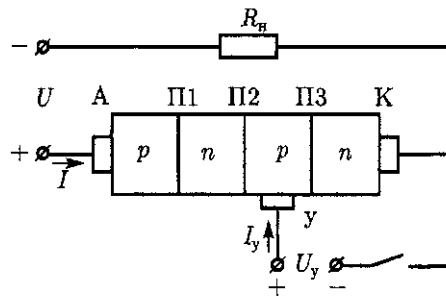


Рис. 34.3. К объяснению работы тиристора

повной ток  $I$ . После этого влияние управляющего электрода  $У$  на электропроводность тиристора прекратится, т. е. если снять напряжение управления  $U_y$ , то ток в тиристоре не прекратится и он будет работать как неуправляемый диод. Для того чтобы основной ток  $I$  через тиристор прекратился, необходимо либо разомкнуть анодную цепь, либо подать на эту цепь тиристора импульс обратного напряжения (минус на аноде). Для повторного открывания тиристора необходимо вновь приложить некоторое напряжение между анодом и катодом и подать хотя бы кратковременно управляющий сигнал  $U_y$  между управляющим электродом и катодом. Таким образом, после того как тиристор открыт, его электропроводность не зависит от величины или полярности управляющего напряжения. Другими словами, тиристор имеет два устойчивых состояния: закрытое и открытое. В этом отношении тиристоры аналогичны электромагнитным реле.

Тиристоры обладают высоким КПД, малой мощностью управления и неограниченным сроком службы. Для улучшения условий охлаждения тиристоры снабжают ребристыми радиаторами. Если тиристор включить в цепь переменного тока, то при подаче положительного потенциала на управляющий электрод во время положительной полуволны анодного напряжения тиристор откроется и в нем появится основной ток  $I$ . После прекращения положительной полуволны напряжения переменного тока тиристор закроется. При следующей положительной полуволне для открывания тиристора необходимо вновь подать положительный потенциал на управляющий электрод. Таким образом, тиристоры можно применять как в цепях постоянного, так и переменного тока.

### Порядок выполнения работы

**Бесконтактное управление электроприводом с применением магнитного усилителя.** На рис. 34.4 представлена неререверсивная схема управления двигателем постоянного тока независимого возбуждения  $M$ . В цепь обмотки якоря этого двигателя включен диод  $VD$ , осуществляющий однополупериодное выпрямление переменного тока. Для полного использования двигателя по мощности, учитывая однополупериодное выпрямление, напряжение, подводимое к цепи якоря, следует принять равным  $1,5 U_{ном}$  (здесь  $U_{ном}$  — номинальное напряжение двигателя). Например, при номинальном напряжении 110 В цепь якоря следует питать напряжением 165 В. Питание цепи якоря осуществляется через трансформатор  $T$ . Для управления величиной тока якоря в первичную цепь трансформатора включена рабочая обмотка  $w_{раб}$  магнитного усилителя (МУ). Управляющий сигнал  $U_y$  на обмотку управления  $w_y$  усилителя подается от потенциометра  $RP$  через выпрямитель  $UZ$  и резистор  $R$ , назначение которого ограничивать ток управления  $I_y$  до значения, не превышающего допустимое.

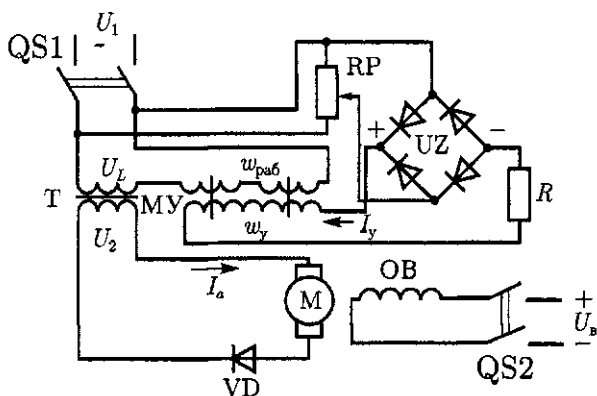


Рис. 34.4. Управление электроприводом постоянного тока с применением магнитного усилителя

Обмотка возбуждения  $OB$  двигателя  $M$  включена в сеть постоянного тока на напряжение  $U_b$ . При крайнем верхнем положении движка потенциометра  $RP$  напряжение управления  $U_y = 0$ , при этом рабочая обмотка усилителя обладает наибольшим сопротивлением, ток якоря  $I_a$  весьма мал и якорь двигателя неподвижен.

При перемещении движка потенциометра  $RP$  в сторону, соответствующую увеличению напряжения сигнала  $U_y$ , в обмотке управления  $w_y$  усилителя появляется ток управления  $I_y$ . Это приводит к магнитному насыщению магнитопровода усилителя, а следовательно, к уменьшению электрического сопротивления рабочей обмотки. В результате ток в цепи якоря двигателя увеличивается и якорь начинает вращаться. При этом с возрастанием тока управления  $I_y$  частота вращения якоря увеличивается.

Для удобства исследования регулировочных свойств электропривода весь рабочий диапазон перемещения движка потенциометра  $RP$  имеет шкалу с равномерными пронумерованными делениями.

Параметры элементов электропривода выбирают в зависимости от номинальных данных двигателя  $M$ . Например, если в качестве  $M$  применяют двигатель типа СЛ-661 с номинальными данными  $P_{ном} = 230$  Вт,  $U_{ном} = 110$  В,  $I_{ном} = 2,9$  А,  $n_{ном} = 2700$  об/мин, то силовой трансформатор  $T$  должен иметь номинальные напряжения 220/165 В, в цепь якоря следует включить диод Д-245, а для регулировки тока применить магнитный усилитель УМ-1П-20-40-4-1 со следующими параметрами: напряжение рабочей обмотки 220 В, номинальный ток рабочей обмотки 3,5 А, допустимый ток управления 0,415 А (сопротивление обмотки управления 9,34 Ом).

Ознакомившись с устройством лабораторного стенда, собирают схему по рис. 34.4. После проверки схемы преподавателем включают рубильники  $QS1$  и  $QS2$ , предварительно поставив движок по-

Номер деления на RP							
$n$ , об/мин							

тениометра в положение, соответствующее нулевому значению управляющего сигнала. Затем постепенно перемещают движок потенциометра в сторону, соответствующую увеличению сигнала  $U_y$ , вызывая возрастание частоты вращения якоря двигателя М. Приблизительно через одинаковые интервалы делений на шкале потенциометра RP измеряют частоту вращения двигателя М. Значения частоты вращения  $n$  и соответствующие им номера делений  $N_y$  на шкале потенциометра RP заносят в табл. 34.1.

Затем строят регулировочную характеристику электропривода в режиме холостого хода  $n = f(N_y)$ .

**Бесконтактное управление электроприводом с применением тиристора.** На рис. 34.5 представлена нереверсивная схема управления двигателем постоянного тока независимого возбуждения М. В отличие от предыдущей схемы электропривода (см. рис. 34.4) в этой схеме управление величиной тока в цепи якоря двигателя осуществляется посредством тиристора VS. Силовой трансформатор Т и двигатель М в данной схеме применены те же, что и в электроприводе рис. 34.4.

Обмотка возбуждения двигателя ОВ включена непосредственно в сеть постоянного тока на напряжение  $U_B$ . Величину тока через

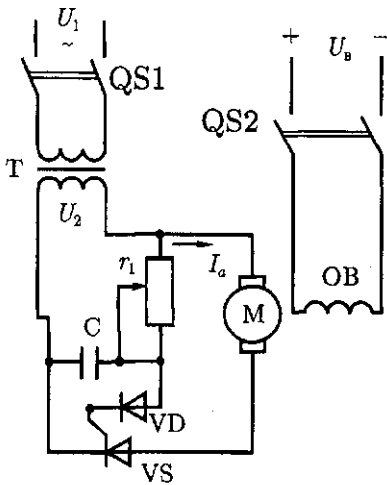


Рис. 34.5. Управление электроприводом постоянного тока с применением тиристора

тиристор регулируют по принципу фазового управления тиристором. Этот способ основан на изменении времени момента отпирания тиристора. С этой целью в схеме применена фазосдвигающая цепочка  $r_1 C$ , где  $r_1$  — резистор переменного сопротивления. Значение управляющего сигнала  $U_y$  и его фазовый сдвиг относительно напряжения  $U_2$  зависят от сопротивления резистора  $r_1$ . При полностью введенном сопротивлении  $r_1$  значительная часть напряжения  $U_2$  расходуется на переменном резисторе, так что падение напряжения на конденсаторе  $U_c = U_y$  оказывается недостаточным для создания напряжения управления, требуемого для отпирания тиристора. С уменьшением

Таблица 34.2

Номер деления на $r_1$								
$n$ , об/мин								

сопротивления  $r_1$  напряжение  $U_c$  возрастает и достигает значения, достаточного для отпирания тиристора при положительной полуволне напряжения  $U_2$ . Однако это напряжение  $U_c = U_y$  оказывается сдвинутым по фазе относительно напряжения  $U_2$ , так что отпирание тиристора происходит ближе к середине положительной полуволны напряжения  $U_2$ . Поэтому действующее значение тока  $I_a$  в цепи якоря двигателя М невелико и якорь вращается с небольшой частотой. Таким образом, в рассматриваемой схеме имеет место фазовое управление тиристором.

При дальнейшем уменьшении сопротивления  $r_1$  фаза напряжения на управляющем электроде тиристора меняется таким образом, что отпирание тиристора происходит в более ранний момент времени. При этом действующее значение тока якоря  $I_a$  двигателя возрастает, что ведет к увеличению электромагнитного момента, а следовательно, и частоты вращения двигателя.

Назначение диода VD в цепи управления тиристора VS состоит в том, чтобы исключить попадание отрицательного потенциала на управляющий электрод.

Для управления электродвигателем постоянного тока типа СЛ-661 можно применить тиристор КУ202К. В цепи управления этого тиристора можно использовать переменный резистор типа ППБ-3В сопротивлением 4,7 кОм и конденсатор типа ПБГО емкостью 1 мкФ.

Ознакомившись с устройством лабораторного стенда и назначением всех его элементов, собирают схему по рис. 34.5. После проверки схемы преподавателем включают рубильники QS1 и QS2 и, плавно поворачивая ручку переменного резистора  $r_1$ , увеличивают частоту вращения двигателя. Через приблизительно одинаковое количество делений на шкале этого резистора измеряют частоту вращения двигателя и заносят в табл. 34.2.

Затем строят регулировочную характеристику электропривода, представляющую собой зависимость частоты вращения от числа делений на шкале переменного резистора в режиме холостого хода.

### Анализ результатов лабораторной работы

Отчет о лабораторной работе должен содержать принципиальные схемы исследуемых электроприводов, спецификацию элементов каждой схемы и выводы об эффективности работы лабораторных установок.



Анализируя регулировочные характеристики электропривода, определяют диапазон изменения частоты вращения двигателя, соответствующий участку характеристики, наиболее близкому к прямой линии.

Сравнив регулировочные характеристики электроприводов с магнитным усилителем и с тиристором, делают вывод о достоинствах и недостатках каждого из них. При этом необходимо иметь в виду регулировочные свойства, габариты, массу и стоимость регулирующих устройств, примененных в каждой схеме электропривода.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое бесконтактное управление электроприводом и каковы его преимущества перед контактным?
2. На чем основан принцип действия магнитного усилителя и почему эти усилители делают на двух сердечниках?
3. Объясните устройство и принцип действия тиристора.
4. Будет ли работать электропривод, собранный по рис. 34.4, если рабочую обмотку магнитного усилителя включить непосредственно в цепь якоря электродвигателя?
5. Возможна ли работа электропривода, собранного по рис. 34.5, если конденсатор в цепи управления тиристора заменить на резистор соответствующего сопротивления?
6. Каким образом можно уменьшить пульсации тока в цепи якоря электродвигателя в рассматриваемых электроприводах?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 35**

### **Исследование замкнутой системы электрического привода с обратной связью по скорости**

**Цель работы.** Опытное определение регулировочных свойств электропривода, выполненного по замкнутой схеме с применением обратной связи по скорости, и приобретение практических навыков в сборке схемы электропривода и ее исследовании.

### **Программа работы**

1. Ознакомиться с устройством лабораторного стенда, записать паспортные данные двигателя и других элементов схемы.
2. Собрать схему по рис. 35.1. После проверки схемы преподавателем включить электропривод, снять данные и построить механические характеристики электропривода  $n = f(M_2)$  при его работе:
  - а) без обратной связи при однополупериодном выпрямлении переменного тока при частоте вращения якоря двигателя  $n_{0,25} = n_{ном}$  с минимально допустимой нагрузкой  $M_2 = 0,25M_{ном}$ ;

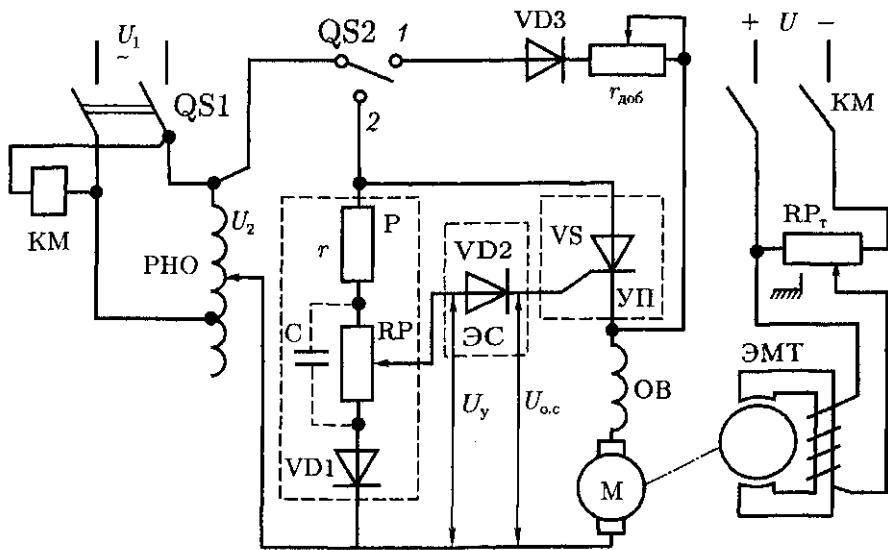


Рис. 35.1. Схема лабораторной установки замкнутой автоматической системы электропривода со стабилизацией частоты вращения двигателя постоянного тока

б) с отрицательной обратной связью по частоте вращения для трех ее значений при минимально допустимой нагрузке на валу двигателя  $M_2 = 0,25M_{ном}$ :

$$n_{0,25} = n_{ном}; n_{0,25} = 1,1n_{ном}; n_{0,25} = 1,2n_{ном}$$

3. Используя результаты опытов п. 2, определить номинальное изменение частоты вращения электропривода при сбросе нагрузки от номинальной до  $0,25M_{ном}$  для каждой механической характеристики.

4. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал; принципы построения замкнутых систем электропривода; положительный и отрицательный виды обратной связи; замкнутая система электропривода со стабилизацией частоты вращения.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицу для занесения результатов опытов и координатную сетку для построения графиков.

### Основные понятия

В любой автоматической системе различают предписанное (предполагаемое) значение управляемого параметра и истинное значение

ние параметра. Как было показано, разомкнутая система автоматического управления не обеспечивает точного соответствия между этими параметрами из-за неизбежного воздействия на систему случайных (непредвиденных) факторов.

В замкнутых системах помимо *прямой цепи воздействий*, по которой передается задающий сигнал управления  $U_y$ , несущий информацию о предписанном значении параметра, имеются *цепи обратной связи*, по которым передается сигнал, несущий информацию об истинном (фактическом) значении параметра, называемый *сигналом обратной связи*  $U_{o.c.}$  Обратная связь — это воздействие на вход автоматической замкнутой системы физической величины (сигнала обратной связи), пропорциональной выходной величине регулируемого параметра. Сигнал обратной связи обычно получают посредством устройства, называемого датчиком обратной связи ДОС. Однако в рассматриваемой схеме такой датчик отсутствует, а в качестве сигнала обратной связи используется ЭДС обмотки якоря двигателя (противоЭДС). Известно, что величина этой ЭДС пропорциональна частоте вращения

$$E_a = c_e \Phi n. \quad (35.1)$$

Таким образом, в рассматриваемой схеме двигатель М помимо своего основного назначения используется в качестве датчика обратной связи, вырабатывая сигнал  $U_{o.c.} = E_a$ .

Структурная схема рассматриваемого электропривода (рис. 35.2) содержит следующие элементы: регулятор Р, элемент сравнения ЭС, управляемый преобразователь УП, двигатель М и рабочий орган РО (нагрузка на вал двигателя), представляющий собой как бы элемент производственного механизма, приводимый в движение двигателем.

Электрическая энергия при напряжении  $U_2$  поступает в управляемый преобразователь УП из сети, а затем подается в рабочую цепь (цепь якоря) двигателя М. Режим работы преобразователя УП определяется входным сигналом  $U_{вх}$ , подаваемым на вход УП. Значение этого сигнала определяется разностью значений управляющего сигнала  $U_y$ , поступающего от регулятора, и сигналом отрицательной обратной связи  $U_{o.c.}$ , поступающим от датчика обратной связи, в данном случае от двигателя М:

Электрическая энергия при напряжении  $U_2$  поступает в управляемый преобразователь УП из сети, а затем подается в рабочую цепь (цепь якоря) двигателя М. Режим работы преобразователя УП определяется входным сигналом  $U_{вх}$ , подаваемым на вход УП. Значение этого сигнала определяется разностью значений управляющего сигнала  $U_y$ , поступающего от регулятора, и сигналом отрицательной обратной связи  $U_{o.c.}$ , поступающим от датчика обратной связи, в данном случае от двигателя М:

$$U_{вх} = U_y - U_{o.c.} \quad (35.2)$$

На рис. 35.1 пунктиром обведены элементы принципиальной схемы электропривода, соответствующие элементам структурной схемы этого электропривода (см. рис. 35.2).

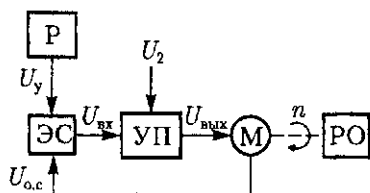


Рис. 35.2. Структурная схема замкнутой системы электропривода с обратной связью по скорости

## Лабораторная установка

Величина управляющего сигнала  $U_y$  определяется положением движка потенциометра RP (регулятор P). Элементом сравнения схемы является диод VD2, так как ток через этот диод определяется разностью напряжений  $U_y - U_{o.c.}$ . Ток через диод VD1 проходит лишь в положительные полупериоды напряжения  $U_2$ . При малых частотах вращения якоря двигателя, когда противоЭДС якоря (сигнал обратной связи) весьма мала, работа двигателя неустойчива и сопровождается «качаниями» двигателя. С целью устранения этого явления потенциометр RP иногда шунтируют конденсатором С (на схеме рис. 35.1 показан пунктиром).

Элементы схемы исследуемого электропривода выбирают в зависимости от паспортных данных двигателя М. Например, если в качестве М применить универсальный коллекторный двигатель типа УЛ072 номинальной мощностью 180 Вт, напряжением постоянного тока 110 В, номинальным током 2,48 А и номинальной частотой вращения 2700 об/мин, то в схеме следует использовать тиристор КУ202К, резистор  $r = 2$  кОм (2 Вт), переменный резистор RP = 4,7 кОм (2 Вт) и два диода Д-207. При необходимости для устранения «качания» в схему можно включить электролитический конденсатор С = 5 мкФ (50 В). Применение двигателя другой мощности потребует включения в схему элементов с другими параметрами.

Использование в исследуемом электроприводе двигателя последовательного возбуждения оправдано тем, что такие двигатели имеют «мягкую» механическую характеристику, поэтому стабилизация частоты вращения в них является актуальной и дает наглядное представление об эффективности исследуемой схемы электропривода. Для уменьшения пульсаций тока в цепи двигателя возможно включение в схему дросселя L.

Посредством ключа QS2 меняется режим работы лабораторной установки. При положении 1 этого ключа двигатель М работает непосредственно от сети переменного тока в режиме однополупериодного выпрямления диодом VD3, а переменный резистор  $r_{доб}$  позволяет установить номинальную частоту вращения при минимально допустимой нагрузке. При положении 2 ключа QS2 двигатель М включается в автоматическую систему электропривода.

Включение лабораторной установки в сеть осуществляется рубильником QS1. При этом одновременно включается катушка контактора КМ, контакты которого подключают к источнику постоянного тока электромагнитный тормоз ЭМТ, создающий нагрузку на валу двигателя. Это исключает включение в сеть двигателя последовательного возбуждения без необходимой нагрузки на валу. Потенциометр электромагнитного тормоза RP<sub>т</sub> должен иметь ограничитель, исключающий его нулевое положение, при котором нагрузка на валу двигателя отсутствует.

**Механические характеристики электропривода.** После тщательного изучения лабораторной установки следует поставить ключ QS2 в положение 1 и снять данные для построения механической характеристики в соответствии с п. 2а «Программа работы», т. е. без тиристора VS. Для этого включают рубильник QS1, устанавливают регулятором напряжения РНО требуемое напряжение питания  $U_2$  и посредством резистора  $r_{доб}$  и потенциометра электромагнитного тормоза ЭМТ устанавливают номинальную частоту вращения двигателя при нагрузке на валу  $M_2 = 0,25M_{ном}$ . После этого посредством ЭМТ постепенно увеличивают нагрузку на вал двигателя до  $M_{ном}$ , одновременно измеряя частоту вращения. Всего следует сделать 4–5 замеров и занести их в табл. 35.1.

Таблица 35.1

$M_2, \text{Н} \cdot \text{м}$					
$n, \text{об/мин}$					

По полученным данным строят естественную механическую характеристику двигателя (рис. 35.3, график 4).

Затем ключ QS2 переводят в положение 2 и снимают данные механических характеристик двигателя при его питании через тиристор VS в соответствии с п. 2б «Программа работы». Для этого движок потенциометра RP ставят в положение, при котором частота вращения двигателя при минимально допустимой нагрузке на валу была бы равна номинальному значению  $n_{ном}$ . Затем электромагнитным тормозом ЭМТ постепенно увеличивают нагрузку на вал электродвигателя до номинального значения нагрузочного момента.

Приблизительно через одинаковые интервалы нагрузочного момента  $M_2$  измеряют частоту вращения якоря двигателя. Делают не менее четырех замеров и заносят их в табл. 35.2.

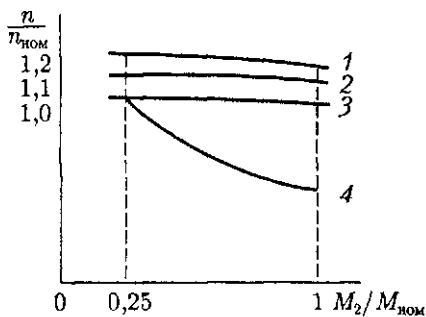


Рис. 35.3. Механические характеристики электропривода по рис. 35.1

Опыт повторяют при частотах вращения  $n_{0,25} = 1,1n_{ном}$  и  $n_{0,25} = 1,2n_{ном}$ , результаты измерений заносят в табл. 35.2 и строят три механические характеристики электропривода в различных режимах его работы (рис. 35.3, графики 1, 2 и 3).

Для количественной оценки эффективности исследуемой схемы электропривода с обратной связью по скорости следует

Таблица 35.2

Номер измерения	$n_{0,25} = n_{ном}$		$n_{0,25} = 1,1n_{ном}$		$n_{0,25} = 1,2n_{ном}$	
	$M_2, Н \cdot м$	$n, об/мин$	$M_2, Н \cdot м$	$n, об/мин$	$M_2, Н \cdot м$	$n, об/мин$
1						
2						
3						
4						
	$\Delta n_1 = \dots$		$\Delta n_2 = \dots$		$\Delta n_3 = \dots$	

рассчитать значение изменения частоты вращения (%) якоря двигателя от номинальной до минимальной:

$$\Delta n = [(n_{0,25} - n_{\min})/n_{0,25}]100. \quad (35.3)$$

Расчет  $\Delta n$  следует выполнить для всех режимов исследования электропривода.

Отчет о проделанной работе должен содержать принципиальную схему электропривода, спецификацию элементов этой схемы и выводы об эффективности применения обратной связи по частоте вращения. При этом следует указать, в каком из исследованных трех режимах работы стабилизация частоты вращения наиболее близка к идеальной ( $n = \text{const}$ ), т.е. сравнить величины  $\Delta n$  для этих режимов между собой и с величиной  $\Delta n$  для режима работы двигателя без обратной связи (рис. 35.3, график 4).

#### **Контрольные вопросы**

1. Какой параметр двигателя используется в качестве сигнала обратной связи в рассматриваемом электроприводе?
2. Объясните назначение всех элементов рассматриваемого электропривода.
3. Каким образом можно устранить возможную неустойчивость работы электропривода при малой частоте вращения?
4. Изменится ли эффект стабилизации частоты вращения двигателя при увеличении частоты вращения, задаваемой потенциометром  $R_n$ ?

### **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 36**

#### **Исследование тиристорного электрического привода постоянного тока типа ЭТО1**

**Цель работы.** Получить экспериментальное подтверждение регулируемым и стабилизирующим свойствам электропривода

ЭТО1 и приобрести навыки в сборке схемы и регулировке электропривода.

### Программа работы

1. Ознакомиться с электроприводом ЭТО1 и записать его паспортные данные и данные двигателя.
2. Собрать схему электропривода по рис. 36.1 и после проверки ее преподавателем опробовать электропривод в работе.
3. Провести испытания электропривода с целью опытной проверки следующих параметров:
  - а) диапазона регулирования частоты вращения;
  - б) номинальной мощности электропривода при максимальной частоте вращения;
  - в) колебания частоты вращения при изменении тока якоря двигателя от 0,1 до  $1,0 I_{\text{аном}}$  при частотах вращения якоря  $0,08 n_{\text{ном}}$  и  $n_{\text{ном}}$ .
4. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал: принцип построения замкнутых систем автоматического электропривода; структурная схема и принцип работы тиристорного электропривода постоянного тока типа ЭТО1; принципиальная схема блока силовых вентилях (БСВ): назначение элементов блока, схема и работа тахометрического моста.
2. Подготовить в рабочей тетради таблицу для занесения результатов опытов.

### Основные понятия

Особенности замкнутых систем автоматического электропривода изложены в лабораторной работе № 35 «Основные понятия».

Нереверсивный однофазный тиристорный электропривод постоянного тока типа ЭТО1 предназначен для приведения в движение рабочих органов механизмов и плавного регулирования их частоты вращения. Электропривод ЭТО1 выполнен по системе «управляемый преобразователь – двигатель» с применением отрицательной обратной связи по частоте вращения якоря.

### Лабораторная установка

Электропривод (рис. 36.1) состоит из управляемого тиристорного преобразователя УТП, сглаживающего дросселя  $L_1$ , двигателя постоянного тока независимого возбуждения М и задатчика скорости ЗС. Кроме того, в схеме используется однофазный регулятор напряжения РНО и электромагнитный тормоз ЭМТ. Два последних

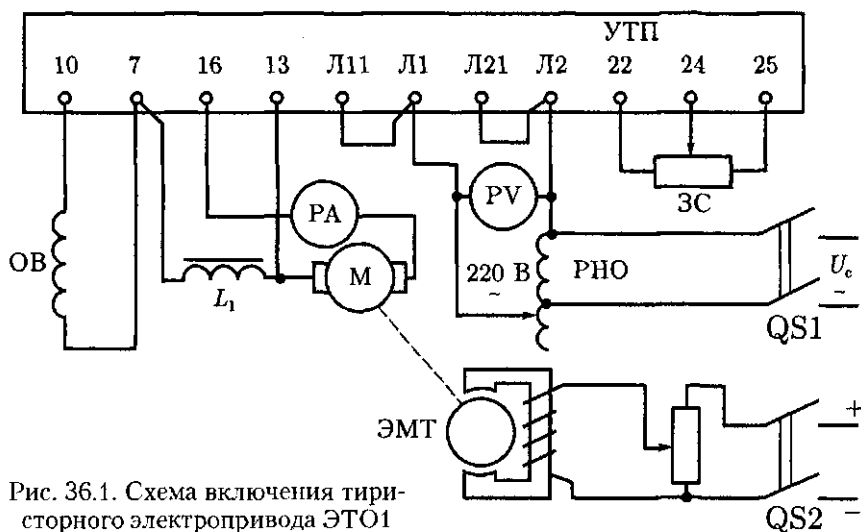


Рис. 36.1. Схема включения тиристорного электропривода ЭТО1

устройства не являются элементами электропривода ЭТО1, а применены в схеме для исследования электропривода по заданной программе.

Управляемый тиристорный преобразователь УТП состоит из полупроводникового усилителя УП (рис. 36.2), системы импульсно-фазового управления СИФУ, блока питания БП и блока силовых вентилей БСВ, преобразующего переменное напряжение сети 220 В в регулируемое выпрямленное напряжение. Основные элементы БСВ: неуправляемый однофазный выпрямительный мост VD1 – VD4, тиристор VS и тахометрический мост (рис. 36.3).

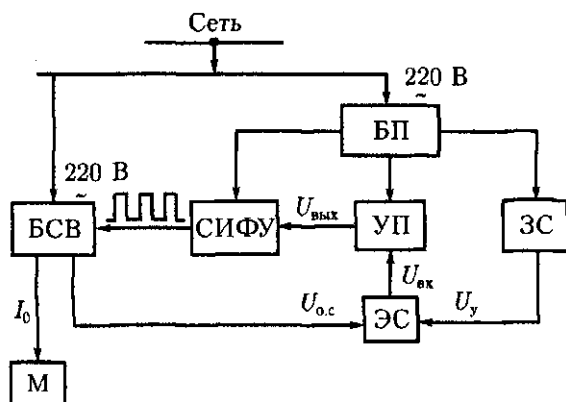


Рис. 36.2. Структурная схема электропривода ЭТО1



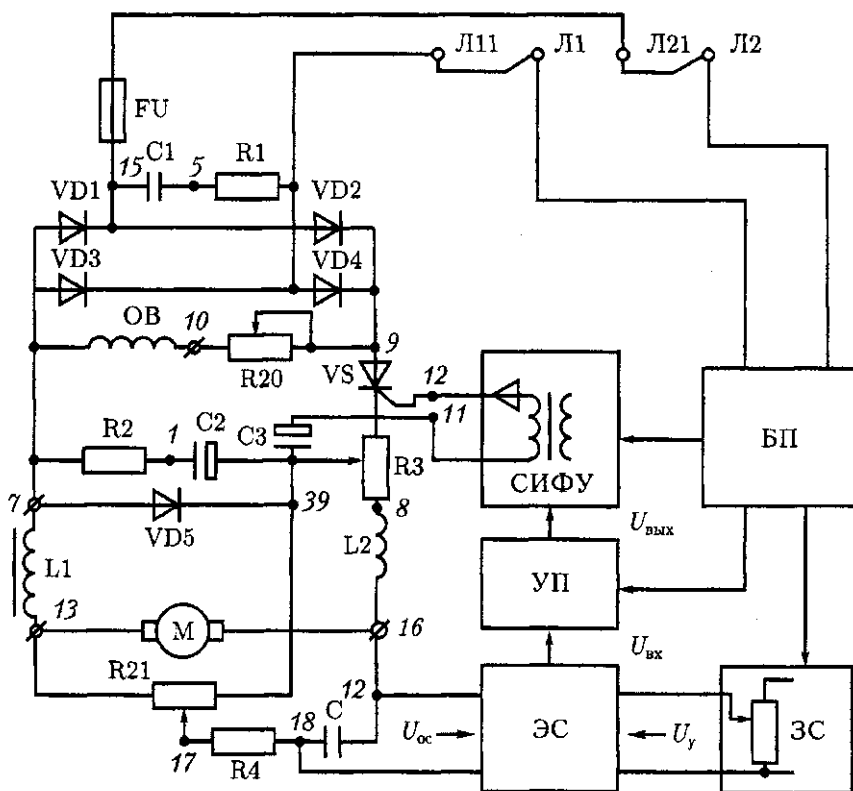


Рис. 36.3. Принципиальная схема блока силовых вентилей БСВ электропривода ЭТ01

Полупроводниковый усилитель УП представляет собой однокаскадный усилитель постоянного тока, усиливающий управляющий сигнал. Система импульсно-фазового управления СИФУ состоит из генератора пилообразного напряжения, формирователя импульсов прямоугольной формы, предназначенных для отпирания тиристора VS. Блок питания БП служит для создания постоянного напряжения, необходимого для электропитания блоков, осуществляющих управление электроприводом: УП, СИФУ и задатчика скорости ЗС. Этот блок состоит из трехобмоточного силового трансформатора (одна первичная обмотка и две вторичные), двух неуправляемых выпрямительных мостов и двух конденсаторных фильтров.

От ЗС на вход элемента сравнения ЭС подается управляющий сигнал  $U_y$ , который создает на входе полупроводникового усилителя УП напряжение  $U_{вх}$ . После усиления этот сигнал преобразуется в напряжение  $U_{вых}$ , которое воздействует на систему импульсно-фазового управления СИФУ. В результате этого воздействия на

выходе СИФУ появляются импульсы прямоугольной формы положительной полярности и определенной фазы  $\alpha$ . Эти импульсы поступают на управляющий электрод тиристора VS блока силовых вентилях БСВ. Изменения величины  $U_{\text{вх}}$  влияют на фазу  $\alpha$  прямоугольных импульсов, управляющих тиристором VS, что в конечном итоге ведет к изменению среднего значения выходного напряжения блока БСВ, т. е. к изменению напряжения, подводимого к цепи якоря двигателя.

В электроприводе ЭТО1 применена отрицательная обратная связь по частоте вращения. Сигнал обратной связи  $U_{\text{о.с.}}$ , значение которого пропорционально частоте вращения якоря двигателя, подается на элемент сравнения ЭС, так что напряжение  $U_{\text{вх}}$ , поступающее за вход усилителя УП, определяется разностью двух сигналов: сигнала управления  $U_y$  от задатчика скорости ЗС и сигнала обратной связи  $U_{\text{о.с.}}$ :

$$U_{\text{вх}} = U_y - U_{\text{о.с.}} \quad (36.1)$$

Наличие отрицательной обратной связи по частоте вращения способствует стабилизации частоты вращения двигателя и обеспечивает его устойчивую работу при изменениях нагрузки.

Блок силовых вентилях БСВ (см. рис. 36.3) имеет два выхода: неуправляемый (точки 7 и 9) для питания обмотки возбуждения ОВ двигателя и управляемый (точки 7 и 11) для питания цепи якоря двигателя. Неуправляемый диод VD5, так же как и дроссель L1, способствует уменьшению пульсаций выпрямленного напряжения.

К блоку БСВ относятся также тахометрический мост. Плечи этого моста образуют переменные резисторы R3 и R21 и обмотка якоря двигателя. В одну диагональ моста (точки 13 и 11) подводится напряжение постоянного тока, питающее цепь якоря двигателя, с другой диагонали (точки 18 и 16) снимается напряжение сигнала обратной связи  $U_{\text{о.с.}}$ .

Вход блока силовых вентилях БСВ имеет два вида защиты: цепочка R1 — C1 защищает блок от перенапряжений со стороны питающей сети, а предохранитель FU защищает блок от перегрузки и короткого замыкания. В связи с тем что тиристор VS включен в цепь постоянного тока (после выпрямительного моста VD1 — VD4), при прекращении управляющего импульса тиристор может не закрыться. Объясняется это тем, что пульсации тока из-за наличия дросселя L1 и обмотки якоря, обладающей значительной индуктивностью, намного ослаблены и по окончании положительного полупериода ток в цепи не спадает до нуля. В результате тиристор может оказаться неуправляемым. Для исключения этого нежелательного явления в схеме БСВ применены цепочки R2 — C2 и R3 — C3, которые создают отрицательный импульс напряжения по отношению к аноду тиристора, чем обеспечивается его запираение по окончании каждой полуволны напряжения в цепи двигателя.

## Порядок выполнения работы

**Подготовка электропривода к работе.** После сборки схемы электропривода по рис. 36.1 и проверки ее преподавателем необходимо проделать следующее:

а) задатчик скорости ЗС поставить в положение, соответствующее минимальной частоте вращения;

б) включить рубильник QS1, установить регулятором РНО на входе управляемого тиристорного преобразователя УТП напряжение 220 В и оставить включенным электропривод на 15 мин при минимальной частоте вращения якоря двигателя;

в) поворачивая ручку задатчика скорости ЗС из одного крайнего положения в другое, проверить возможность регулировки частоты вращения двигателя;

г) установить номинальную частоту вращения  $n$ , включив рубильник QS2, посредством электромагнитного тормоза ЭМТ нагрузить двигатель до номинального значения тока якоря двигателя.

Убедившись в работоспособности электропривода, проверяют влияние обратной связи по частоте вращения на устойчивость электропривода. Для этого размыкают цепь обратной связи, отключив резистор R21 от клеммы 13 (при этом тахометрический мост размыкается). Затем задатчиком скорости ЗС изменяют частоту вращения двигателя  $n$ , включив рубильник QS2, проверяют устойчивость работы электропривода при нагрузке двигателя.

**Проверка диапазона регулирования частоты вращения.** Включают электропривод в сеть, задатчиком скорости ЗС устанавливают наибольшую частоту вращения, затем замыкают рубильник QS2, нагружают двигатель с помощью ЭМТ до номинального значения тока якоря и измеряют частоту вращения  $n'_{\max}$ . Не снимая нагрузки, устанавливают минимальную частоту вращения  $n'_{\min}$ . Измеренные значения частот вращения заносят в табл. 36.1 и, сравнив их с аналогичными значениями частот вращения  $n_{\max}$  и  $n_{\min}$ , указанными в паспорте электропривода, определяют отклонения опытных данных от паспортных:

для максимальной

$$\Delta n_{\max} = \frac{n_{\max} - n'_{\max}}{n} 100 \quad (36.2)$$

и минимальной

$$\Delta n_{\min} = \frac{n_{\min} - n'_{\min}}{n_{\min}} 100 \quad (36.3)$$

частот вращения двигателя.

**Измерение номинальной мощности электропривода при максимальной частоте вращения.** Посредством ЗС устанавливают максимальную частоту вращения и нагружают двигатель до номиналь-

Таблица 36.1

Парамстр электропривода	Опытные данные	Паспортные данные	Отклонение опытных данных от паспортных
Диапазон регулирования частоты вращения, об/мин	$n'_{\max} = \dots$ $n'_{\min} = \dots$	$n_{\max} = \dots$ $n_{\min} = \dots$	$\Delta n_{\max} = \dots \%$ $\Delta n_{\min} = \dots \%$
Номинальная мощность при максимальной частоте вращения, Вт	$P'_{\text{ном}} = \dots$	$P_{\text{ном}} = \dots$	$(P'_{\text{ном}}/P_{\text{ном}})100 = \dots \%$
Колебания частоты вращения при изменении тока якоря, %	$\gamma_{0,08} = \dots$ $\gamma_{\text{ном}} = \dots$	$\pm 5$ $\pm 10$	$\gamma_{0,08} - 5 = \dots$ $\gamma_{\text{ном}} - 10 = \dots$

ного тока нагрузки. Затем, измерив частоту вращения  $n_2$  и момент нагрузки  $M_2$  на валу двигателя, определяют мощность электропривода (Вт)

$$P_{\text{ном}} = 0,105 M_2 n \quad (36.4)$$

и полученное значение заносят в табл. 36.1.

**Проверка колебания частоты вращения при изменении тока якоря двигателя.** Установив частоту вращения двигателя  $n_2 = 0,08 n_{\text{ном}}$  при нагрузке на валу, соответствующей току якоря  $I_a = 0,1 I_{\text{ном}}$ , увеличивают нагрузку двигателя до значения тока якоря  $I_{\text{ном}}$ . При этом измеряют частоту вращения  $n_2$ . По полученным данным определяют отклонение частоты вращения при  $I_{\text{ном}}$  относительно первоначально установленной  $n_2$  (%):

$$\gamma_{0,08} = \frac{n_2 - n_{2\text{ном}}}{n_2} 100. \quad (36.5)$$

Устанавливают частоту вращения  $n_{\text{ном}}$  при нагрузке, соответствующей току якоря  $I_a = 0,1 I_{\text{ном}}$ , и повторяют опыт, определив частоту вращения при номинальной нагрузке электродвигателя  $n'_2$ . Результаты заносят в табл. 36.1 и определяют отклонение частоты вращения от первоначально установленной  $n_{\text{ном}}$  (%):

$$\gamma_{\text{ном}} = \frac{n_{\text{ном}} - n'_2}{n_{\text{ном}}} 100. \quad (36.6)$$

Параметры электропривода, полученные опытным путем, сравнивают с соответствующими параметрами, указанными в паспорте электропривода, и делают вывод о соответствии опытных данных электропривода его паспортным данным по каждому параметру отдельно.

Отчет о проделанной работе должен содержать структурную схему электропривода ЭТО1 и принципиальную схему блока силовых вентилях БСВ, табл. 36.1 и выводы по результатам сравнения опытных данных с паспортными данными электропривода.

### ***Контрольные вопросы***

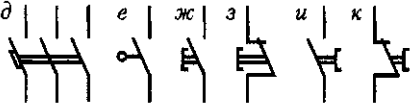
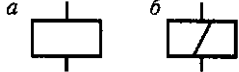
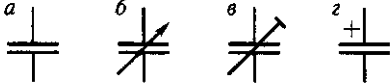
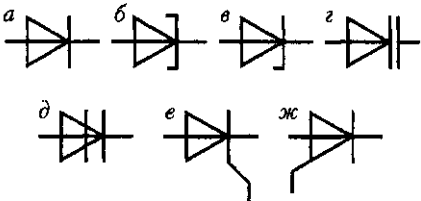
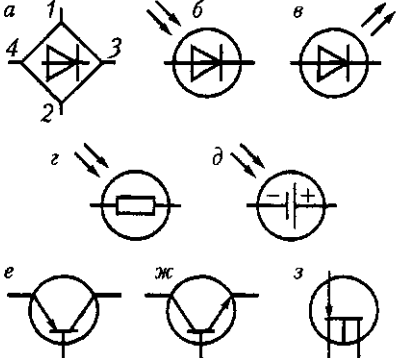
1. Каково назначение и взаимодействие блоков электропривода ЭТО1?
2. С какой целью в электроприводе применена отрицательная обратная связь по частоте вращения?
3. Объясните назначение всех элементов принципиальной схемы блока силовых вентилей БСВ.
4. Какие элементы составляют плечи тахометрического моста и от чего зависит значение сигнала обратной связи по частоте вращения?
5. Какие меры приняты в блоке БСВ для запираания тиристора после каждой положительной полуволны напряжения?

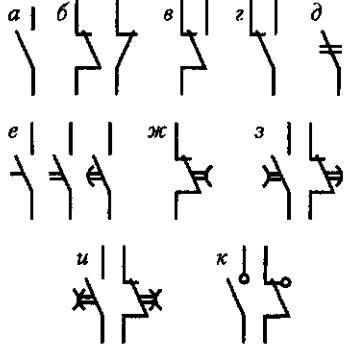
# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение 1

### Условные обозначения некоторых элементов и устройств на электрических схемах

Наименование	Обозначение
<p><i>Электрические машины:</i>  <i>a</i> — генератор переменного тока;  <i>б</i> — двигатель переменного тока;  <i>в</i> — трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;  <i>г</i> — двигатель постоянного тока независимого возбуждения;  <i>д</i> — то же, последовательного возбуждения;  <i>е</i> — то же, параллельного возбуждения;  <i>ж</i> — то же, смешанного возбуждения;  <i>з</i> — то же, с двумя последовательными обмотками возбуждения (реверсивный двигатель)</p>	
<p><i>Трансформаторы:</i>  <i>a</i> — трансформатор;  <i>б</i> — автотрансформатор;  <i>в</i> — реактор;  <i>г, д</i> — трехфазный трансформатор, соединение обмоток «звезда — звезда с нейтральным проводом»;  <i>е, ж</i> — трехфазный трансформатор, соединение обмоток «звезда с нейтральным проводом — треугольник»</p>	
<p><i>Выключатели:</i>  <i>a</i> — однополюсный выключатель;  <i>б</i> — однополюсный разъединитель;  <i>в</i> — трехполюсный выключатель;  <i>г, д</i> — трехполюсный выключатель автоматический;</p>	

Наименование	Обозначение
<p><i>e</i> — путевой однополюсный выключатель;</p> <p><i>ж</i> — кнопка замыкающая с самовозвратом;</p> <p><i>з</i> — кнопка размыкающая с самовозвратом;</p> <p><i>и</i> — кнопка замыкающая без самовозврата;</p> <p><i>к</i> — кнопка размыкающая без самовозврата</p>	
<p><i>Катушки электромеханических устройств</i> (реле, контакторы и т.п.):</p> <p><i>a</i> — общее обозначение;</p> <p><i>б</i> — катушка с одной обмоткой</p>	
<p><i>Конденсаторы:</i></p> <p><i>a</i> — постоянный;</p> <p><i>б</i> — переменный;</p> <p><i>в</i> — подстроечный;</p> <p><i>г</i> — электролитический</p>	
<p><i>Полупроводниковые приборы:</i></p> <p><i>a</i> — диод (общее обозначение);</p> <p><i>б</i> — туннельный диод;</p> <p><i>в</i> — стабилитрон;</p> <p><i>г</i> — варикап;</p> <p><i>д</i> — динистор;</p> <p><i>e</i> — тиристор запираемый с управлением по катоду;</p> <p><i>ж</i> — тиристор запираемый с управлением по аноду</p>	
<p><i>Полупроводниковые приборы:</i></p> <p><i>a</i> — выпрямитель однофазный мостовой;</p> <p><i>б</i> — фотодиод;</p> <p><i>в</i> — светодиода;</p> <p><i>г</i> — фоторезистор;</p> <p><i>д</i> — солнечный фотоэлемент;</p> <p><i>e</i> — транзистор <i>p-n-p</i>-типа;</p> <p><i>ж</i> — транзистор <i>n-p-n</i>-типа;</p> <p><i>з</i> — полевой транзистор с каналом <i>n</i>-типа</p>	

Наименование	Обозначение
<p><b>Контакты:</b>  <i>a</i> – замыкающий;  <i>б</i> – размыкающий;  <i>в</i> – переключающий;  <i>z</i> – с двойным замыканием;  <i>д</i> – с двойным размыканием;  <i>e</i> – замыкающий с механической связью;  <i>ж</i> – с замедлением при срабатывании;  <i>з</i> – с замедлением при возврате (отпускании);  <i>и</i> – с замедлением при срабатывании и возврате;  <i>к</i> – без самовозврата</p>	

## Приложение 2

**Буквенные коды наиболее распространенных элементов  
и устройств, применяемые в электрических схемах**

Код группы элементов	Примеры кодов устройств и элементов
А – Устройства	АК – Блок-реле
В – Преобразователи неэлектрических величин в электрические, и наоборот	ВК – Тепловой датчик ВЛ – Фотоэлемент ВВ – Тахогенератор
С – Конденсаторы	—
Е – Элементы разные	ЕК – Нагревательный элемент ЕЛ – Лампа осветительная
Ф – Разрядники, предохранители, устройства защиты	ФА – Дискретный элемент защиты по току FU – Предохранитель плавкий FV – Разрядник
Г – Генераторы, источники питания	ГВ – Батарея аккумуляторная
Н – Устройства сигнальные	НЛ – Лампа сигнальная НА – Звонок
К – Реле, контакторы, пускатели	КА – Реле тока КН – Реле указательное КК – Реле электротепловое КМ – Контактёр, магнитный пускатель



Код группы элементов	Примеры кодов устройств и элементов
	KT – Реле времени KV – Реле напряжения KL – Реле промежуточное
L – Катушки индуктивности, дроссели, реакторы	LL – Дроссель люминесцентной лампы
M – Двигатели электрические	–
P – Приборы и устройства измерительные	PA – Амперметр PV – Вольтметр PW – Ваттметры PF – Частотомеры PR – Омметр
Q – Выключатели и разъединители в силовых цепях	QF – Выключатель автоматический QS – Разъединитель
R – Резисторы	RK – Терморезистор RP – Потенциометр RS – Шунт измерительный
S – Устройства коммутационные в цепях управления, сигнализации и измерительных	SA – Выключатели и переключатели SF – Выключатели автоматические SB – Выключатели кнопочные SL – Выключатели, срабатывающие от уровня SP – Выключатели, срабатывающие от давления SQ – Выключатели, срабатывающие от положения SR – Выключатели, срабатывающие от частоты вращения SK – Выключатели, срабатывающие от температуры
T – Трансформаторы, автотрансформаторы	TA – Трансформатор тока измерительный TV – Трансформатор напряжения измерительный
U – Преобразователи электрических величин в электрические	UZ – Выпрямитель, инвертор, преобразователь частоты
V – Приборы полупроводниковые и электровакуумные	VD – Диод VT – Транзистор VS – Тиристор VL – Прибор электровакуумный
X – Соединения контактные	XA – Токосъемник, контакты скользящие XP – Штырь XS – Гнездо XT – Соединение разборное XN – Соединение неразборное



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматическое управление электроприводами: Лабораторные работы / Под ред. А. А. Сиротина. — М.: Высшая школа, 1978.
2. *Васин В. М.* Электрический привод. — М.: Высшая школа, 1984.
3. Испытание электрических микромашин / Н. В. Астахов, Б. Л. Крайз, Е. М. Лопухина и др. — М.: Высшая школа, 1984.
4. *Дзюбин И. И.* Тиристоры в электрических схемах. — М.: Энергия, 1972.
5. *Кацман М. М.* Электрические машины. — М.: Издательский центр «Академия», 2014.
6. *Кацман М. М.* Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам и электроприводу. — М.: Высшая школа, 2001.
7. *Кацман М. М.* Электрические машины автоматических устройств. — М.: Форум, 2002.
8. *Келим Ю. М.* Типовые элементы систем автоматического управления. — М.: Форум, 2002.
9. *Москаленко В. В.* Электрический привод. — М.: Мастерство, 2000.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	3
<b>Введение</b> .....	4
В.1. Организация и порядок проведения лабораторных работ .....	4
В.2. Техника безопасности при работах в лабораториях электрических машин и электрического привода .....	5
В.3. Пускорегулирующая аппаратура .....	6
В.4. Устройства для механической нагрузки электродвигателей .....	11
В.5. Измерение электрических величин .....	15
В.6. Измерение частоты вращения электрических машин .....	20
В.7. Общие указания по выполнению лабораторных работ .....	23
В.8. Обработка результатов эксперимента и оформление отчета по лабораторной работе .....	25

## **Раздел первый. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

<b>Глава 1. Трансформаторы</b> .....	28
<i>Лабораторная работа № 1.</i> Исследование силового трансформатора методом холостого хода и короткого замыкания .....	28
<i>Лабораторная работа № 2.</i> Опытное определение групп соединения трехфазного трансформатора .....	37
<i>Лабораторная работа № 3.</i> Исследование параллельной работы трехфазных трансформаторов .....	41
<i>Лабораторная работа № 4.</i> Исследование однофазного автотрансформатора .....	46
<b>Глава 2. Асинхронные машины</b> .....	51
<i>Лабораторная работа № 5.</i> Исследование трехфазного асинхронного двигателя методом непосредственной нагрузки .....	51
<i>Лабораторная работа № 6.</i> Исследование трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором методом холостого хода и короткого замыкания .....	57
<i>Лабораторная работа № 7.</i> Исследование способов пуска трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором .....	65
<i>Лабораторная работа № 8.</i> Исследование трехфазного асинхронного двигателя в однофазном и конденсаторном режимах .....	70
<i>Лабораторная работа № 9.</i> Исследование индукционного регулятора .....	75
<i>Лабораторная работа № 10.</i> Исследование асинхронного исполнительного двигателя .....	79

<b>Глава 3. Синхронные машины</b> .....	87
<i>Лабораторная работа № 11. Исследование трехфазного синхронного генератора</i> .....	87
<i>Лабораторная работа № 12. Исследование трехфазного синхронного генератора, включенного на параллельную работу с сетью</i> .....	94
<i>Лабораторная работа № 13. Исследование трехфазного синхронного двигателя</i> .....	98
<i>Лабораторная работа № 14. Исследование синхронного реактивного конденсаторного двигателя</i> .....	104
<b>Глава 4. Коллекторные машины</b> .....	108
<i>Лабораторная работа № 15. Исследование генератора постоянного тока независимого возбуждения</i> .....	108
<i>Лабораторная работа № 16. Исследование генератора постоянного тока параллельного возбуждения</i> .....	115
<i>Лабораторная работа № 17. Исследование генератора постоянного тока смешанного возбуждения</i> .....	118
<i>Лабораторная работа № 18. Исследование двигателя постоянного тока параллельного возбуждения</i> .....	122
<i>Лабораторная работа № 19. Исследование двигателя постоянного тока последовательного возбуждения</i> .....	126
<i>Лабораторная работа № 20. Исследование двигателя постоянного тока смешанного возбуждения</i> .....	129
<i>Лабораторная работа № 21. Исследование универсального коллекторного двигателя</i> .....	132
<i>Лабораторная работа № 22. Определение КПД машины постоянного тока методом холостого хода</i> .....	136
<i>Лабораторная работа № 23. Исследование электромашинного усилителя поперечного поля</i> .....	142
<i>Лабораторная работа № 24. Исследование исполнительного двигателя постоянного тока</i> .....	146
<i>Лабораторная работа № 25. Исследование сельсинов в индикаторном режиме</i> .....	151

## **Раздел второй. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД**

<b>Глава 5. Основы электрического привода</b> .....	157
<i>Лабораторная работа № 26. Определение момента инерции и махового момента электрического привода методом свободного выбега</i> .....	157
<i>Лабораторная работа № 27. Исследование механических характеристик двигателя постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения</i> .....	164
<i>Лабораторная работа № 28. Исследование механических характеристик трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором</i> .....	180
<i>Лабораторная работа № 29. Исследование регулировочных свойств двигателя постоянного тока независимого возбуждения в системе «генератор — двигатель»</i> .....	190

<i>Лабораторная работа № 30. Исследование свойств системы «преобразователь частоты–асинхронный двигатель»</i> .....	198
<b>Глава 6. Управление электрическими приводами</b> .....	206
<i>Лабораторная работа № 31. Исследование схемы неререверсивного автоматического управления пуском в функции времени и динамическим торможением двигателя постоянного тока параллельного возбуждения</i> .....	206
<i>Лабораторная работа № 32. Исследование схемы неререверсивного автоматического управления пуском в функции времени и динамическим торможением трехфазным асинхронным двигателем с фазным ротором</i> .....	212
<i>Лабораторная работа № 33. Исследование реверсивной схемы автоматического управления пуском и торможением противовключением трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором</i> .....	217
<i>Лабораторная работа № 34. Сборка узлов схем управления электрическими приводами на бесконтактной аппаратуре</i> .....	222
<i>Лабораторная работа № 35. Исследование замкнутой системы электрического привода с обратной связью по скорости</i> .....	230
<i>Лабораторная работа № 36. Исследование тиристорного электрического привода постоянного тока типа ЭТО1</i> .....	235
Приложения .....	243
Список литературы .....	249

*Учебное издание*

**Кацман Марк Михайлович**  
**Лабораторные работы по электрическим машинам**  
**и электрическому приводу**  
**Учебное пособие**

9-е издание, стереотипное

Редактор *Т. Ф. Мельникова*  
Технический редактор *Н. И. Горбачева*  
Компьютерная верстка: *Л. А. Вишнякова*  
Корректор *В. В. Кожуткина*

Изд. № 109100586. Подписано в печать 17.02.2016. Формат 60 × 90 / 16.  
Гарнитура «Петербург». Бумага офсетная № 1. Усл. печ. л. 16,0.  
Тираж 500 экз. Заказ № 1350.

ООО «Издательский центр «Академия». [www.academia-moscow.ru](http://www.academia-moscow.ru)  
129085, Москва, пр-т Мира, 101В, стр. 1.  
Тел./факс: (495) 648-0507, 616-00-29.

Санитарно-эпидемиологическое заключение № РОСС RU. АЕ51. Н 16679 от 25.05.2015.

Отпечатано способом ролевой струйной печати

в АО «Первая Образцовая типография»

Филиал «Чеховский Печатный Двор»

142300, Московская область, г. Чехов, ул. Полиграфистов, д.1

Сайт: [www.chpd.ru](http://www.chpd.ru), E-mail: [sales@chpd.ru](mailto:sales@chpd.ru), т/ф. 8(499)270-73-59



**Кацман Марк Михайлович** – автор учебников электромеханического цикла: «Электрические машины», «Расчет электрических машин», «Электрические машины автоматических устройств» и др. Всего более десяти книг, изданных общим тиражом 60 тысяч экземпляров, которые широко используются в учебных заведениях России и за рубежом. В основе этих книг не только многолетний педагогический, но и большой производственный опыт автора в НИИ и КБ по проектированию электромеханических устройств и электропривода. М. М. Кацман – автор нескольких изобретений, получивших промышленное применение.

## **ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ ПРИВОДУ**

ISBN 978-5-4468-3049-7



9 785446 830497

**Издательский центр  
«Академия»  
[www.academia-moscow.ru](http://www.academia-moscow.ru)**