

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра электрооборудования
сельскохозяйственных предприятий

ЭЛЕКТРОПРИВОД

*Лабораторный практикум
для студентов агроэнергетического факультета
специальности 1-74 05 06 «Энергетическое обеспечение сельского
хозяйства (электроэнергетика)»*

В двух частях

Часть 1

Минск
БГАТУ
2009

УДК 62 – 83 (07)
ББК 31.291 я 7
Э 45

Рекомендовано научно-методическим советом агроэнергетического
факультета БГАТУ

Протокол № 7 от 11 марта 2009 г.

Составители:
канд. техн. наук, доц. *В. В. Гурин*;
ассистент *Е. В. Бабаева*

Рецензенты:
канд. техн. наук, проф. каф. электроснабжения БГАТУ
Г. И. Янукович;
канд. техн. наук, доц. кафедры автоматизации
производственных процессов и электротехники БГТУ
Л. М. Давидович;
зав. лаб. РУП БТИ, д-р техн. наук, проф. *Е. П. Забелло*

Э 45 **Электропривод:** лабораторный практикум. В 2 ч. Ч. 1 /
сост. В. В. Гурин, Е. В. Бабаева. – Минск: БГАТУ, 2009. –
112 с.
ISBN 978-985-519-159-0.

В первой части лабораторного практикума изложены вопросы
техники безопасности и организации работы студентов в лабора-
тории электропривода, общие вопросы исследований в лабора-
тории электропривода и содержание 8 лабораторных работ с при-
ложениями.

Для студентов вузов и ССУЗов специальности 1–74 06 05 01
«Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (электроэнер-
гетика)».

УДК 62 – 83 (07)
ББК 31.291 я 7

ISBN 978-985-519-159-0 (ч. 1)
ISBN 978-985-519-161-3

© БГАТУ, 2009

ВВЕДЕНИЕ

Образовательный стандарт специальности 1-4 06 05 01 «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (электроэнергетика)» предусматривает подготовку инженеров-электриков, которые будут способны решать задачи проектирования, наладки и эксплуатации современных электроприводов в сельскохозяйственном производстве. Для достижения этой цели необходима хорошая подготовка по профилирующим дисциплинам. Дисциплина «Электропривод» является базовой дисциплиной специальности. Новый учебный план специальности «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (электроэнергетика)» и составленная на его основе программа курса «Электропривод» отражают необходимые изменения, продиктованные современностью.

Данное издание призвано обеспечить студентов учебно-методической информацией по лабораторному курсу электропривода. Лабораторный практикум по дисциплине «Электропривод» состоит из двух частей. В первой части лабораторного практикума изложены вопросы техники безопасности и организации работы студентов в лаборатории электропривода, общие вопросы исследований в лаборатории электропривода и содержание 8 лабораторных работ с приложениями.

Во второй части лабораторного практикума по дисциплине «Электропривод» изложено содержание 17 лабораторных работ.

1. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ В ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

1.1. Общие положения

Студент, выполняющий работу в лабораторных условиях, обязан следующее:

- 1) изучить настоящие правила, принять их к обязательному исполнению и расписаться в специальном журнале;
- 2) соблюдать правила внутреннего распорядка, утвержденные ректором университета;
- 3) соблюдать требования техники безопасности, охраны труда и сохранности лабораторного оборудования и приборов;
- 4) предупреждать нарушения требований безопасности со стороны товарищей;
выполнять все требования руководителя, относящиеся к соблюдению правил техники безопасности, порядку выполнения работ и поведению студентов, а также требования по сохранности лабораторного оборудования и приборов;
- 5) заблаговременно готовиться к предстоящему занятию в лаборатории, используя инструкции, методические указания к лабораторным работам и рекомендованную литературу;
- б) при выполнении лабораторной работы находиться только на своем рабочем месте, не трогать оборудование и приборы, не относящиеся к работе, соблюдать тишину и порядок.

Запрещается:

- а) без разрешения трогать или переносить со стола на стол аппараты, приборы и пр.;
- б) заниматься делами, непосредственно не связанными с выполняемой работой;
- в) садиться на столы, ставить ноги на электрические машины, установки или другое оборудование.

При нарушении настоящих правил или требований руководителя студент может быть отстранен от проведения работ и вновь допускается к их выполнению лишь с разрешения заведующего кафедрой или декана.

При всякой порче машин, приборов, аппаратов и другого оборудования или засорении рабочего места студент обязан во внеурочное время устранить повреждения или привести в порядок рабочее место.

За порчу инвентаря и оборудования лаборатории, вызванную несоблюдением настоящих правил, студент несет материальную ответственность.

1.2. Правила техники безопасности

При выполнении работ в лаборатории студенты обязаны помнить о возможности поражения электрическим током и необходимости соблюдения правил техники безопасности. Невыполнение правил безопасности, неосторожное обращение с аппаратурой, невнимательность и, как следствие, случайное прикосновение к токоведущим частям схем могут повлечь за собой серьезные несчастные случаи.

Поэтому при работе в лаборатории электропривода, имеющей разнообразное электротехническое оборудование и вращающиеся электрические машины, нужно соблюдать особую осторожность и следующие **основные правила техники безопасности**.

1. Электрическую схему можно собирать только при отключенном автоматическом выключателе.

2. Включать схему под напряжение разрешается только после ее проверки преподавателем или лаборантом.

3. О включении схемы надо сделать предупреждение присутствующим, убедиться, что никто не касается токоведущих или вращающихся частей.

4. Любые изменения в схеме можно делать только при отключенной электрической сети.

5. В процессе проведения опытов категорически запрещается прикасаться к неизолированным точкам схемы.

6. Во избежание случайного прикосновения к неизолированным точкам схемы **запрещается:**

а) пользоваться временным соединением двух или нескольких проводов скручиванием;

б) включать или отключать схему разрывом цепи проводов (вместо выключателя);

в) применять провода с поврежденной изоляцией;

г) перемещать измерительные приборы без снятия напряжения;

д) располагать тетради при записи показаний на измерительных приборах;

е) оставлять без наблюдения включенные установки;

ж) заходить за установленные ограждения.

7. При срабатывании автоматического выключателя студенты с помощью преподавателя устраняют причину возникновения перегрузки или короткого замыкания; включают схему снова под наблюдением преподавателя.

8. При проведении опытов необходимо следить, чтобы в процессе работы никто из присутствующих не приближался к вращающимся частям.

9. Категорически запрещается касаться рукой или ногой вращающихся частей электродвигателей или электромагнитных тормозов для их торможения.

10. При несчастном случае немедленно отключить установку от сети и оказать первую помощь пострадавшему. Аптечка скорой помощи находится в аппаратной лаборатории. В случае необходимости вызвать скорую помощь по телефону 103.

11. В случае пожара немедленно отключить электропитание лаборатории и принять меры по ликвидации пожара. Вводный выключатель лаборатории находится в аппаратной лаборатории. Ящик с песком находится в цокольном этаже, а огнетушитель – у дверей лаборатории.

В случае необходимости вызвать пожарную команду по телефону 101.

Перед началом работы в лаборатории студенты проходят инструктаж по технике безопасности и расписываются в специальном журнале. Студенты, которые не прошли инструктаж по технике безопасности, к работе в лаборатории не допускаются.

1.3. Порядок выполнения и сдачи лабораторных работ

1. Работы выполняются бригадами по 3–4 человека в соответствии с графиком проведения лабораторных работ.

2. К работе в лаборатории электропривода допускаются студенты, представившие черновик предстоящей работы и сдавшие отчет по предыдущей работе. Черновик предстоящей работы должен включать наименование работы, схему установки, вычерченную от руки, таблицы, в которые будут заноситься результаты опытов, и свободную страницу или две для записи паспортных данных приборов и оборудования, необходимых расчетов и пояснений. Рекомендуется для черновика использовать отдельную ученическую тетрадь в клеточку. Перед началом опытов преподаватель проверяет подготовленность бригады к работе путем опроса по содержанию и методике

выполнения предстоящей работы. Предварительная подготовка к сдаче и выполнению работы проводится дома с использованием лабораторного практикума и рекомендуемой литературы.

3. Объем выполняемой в лаборатории работы определяется преподавателем и включает в себя как экспериментальную, так и расчетную части. В отдельных случаях преподаватель может изменить объем и характер опытов.

4. При выполнении работы студенты должны:

а) ознакомиться с основным оборудованием и вспомогательной аппаратурой, записать их паспортные данные;

б) подобрать электроизмерительные приборы с учетом рода тока и ожидаемых значений измеряемых величин, записать основные данные приборов. Указательные стрелки измерительных приборов поставить на нуль шкалы с помощью корректора;

в) собрать электрическую схему и пригласить преподавателя или лаборанта для проверки. При сборке электрической схемы следует руководствоваться следующим правилом: вначале соединить все последовательные цепи от зажимов автоматического выключателя до испытуемой машины, затем подключить параллельные цепи и цепи управления. Не следует использовать длинные провода там, где можно обойтись короткими проводами. Собранный схема обязательно проверяется всеми студентами, выполняющими данную работу. При этом необходимо обратить особое внимание на целостность соединительных проводов, плотность контактов, затяжку соединительных клемм, положение рукояток аппаратов управления и положение подвижных контактов реостатов (в соответствии с инструкцией к лабораторной работе);

г) включить схему под напряжение и проделать опыт, не производя записей, чтобы ознакомиться с характером процесса;

д) произвести необходимые измерения и занести результаты измерений в черновик. Запись в черновик и последующая обработка опытов должны производиться индивидуально каждым студентом. При замерах следует иметь в виду, что характер экспериментальных кривых с достаточной для лабораторных работ точностью может быть отражен по 4–5 замерам. Меньшее число замеров может привести к искажению действительного характера кривой;

е) показать результаты опыта преподавателю и (только после правильных результатов, с его разрешения) приступить к следующему опыту;

ж) после окончания всей работы черновики сдаются на проверку и подпись преподавателю;

з) после подписи черновики с разрешения преподавателя необходимо разобрать схему, уложить на место провода, приборы, привести в порядок рабочее место. Если в работе использовались конденсаторы, то перед разборкой схемы их следует разрядить путем соединения клемм конденсатора проводником;

и) в оставшееся рабочее время следует оформлять выполненную работу. Уходить из лаборатории до звонка можно только с разрешения преподавателя.

Защита отчета по выполненной лабораторной работе проводится, как правило, в конце занятия, в часы, отведенные на выполнение работы или на консультации. Принимаются к защите отчеты, оформленные с учетом требований, изложенных ниже, и с учетом требований лабораторной работы. Отчет, выполненный небрежно, с ошибками, подлежит переделке и защищается в дополнительно назначенное время (например, на консультации).

По каждой лабораторной работе выставляется оценка; на основании ряда оценок выводится средняя оценка по циклу лабораторных работ, которая учитывается при оценке знаний на экзамене.

При сдаче отчета преподаватель спрашивает студента в объеме материала выполненной работы. Студент должен изложить цель, физическую сущности, методику выполненной работы, назначение использованных машин и оборудования, объяснить и проанализировать полученные результаты.

Студент, выполнивший все работы и своевременно сдавший отчеты по ним, получает допуск к экзамену.

Пропущенные лабораторные работы отрабатываются в течение 10 дней после пропуска.

1.4. Требования по оформлению отчета по лабораторной работе

Отчет о выполненной работе составляется каждым студентом самостоятельно и должен быть представлен преподавателю перед началом очередного занятия.

Как правило, отчет выполняется на нескольких листах бумаги в клеточку из обычной ученической тетради или на листах формата А4. Первый лист отчета – титульный (см. образец на странице 10). На следующей странице указывается цель занятия, приводится принципиальная электрическая схема установки, таблица перечня

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра ЭСХП
Лаборатория электропривода

**Отчет
о лабораторной работе №**

(название работы)

Выполнил: студент 4 курса
_____ группы

Ф.И.О.

дата

Принял: _____
должность

Ф.И.О.

элементов схемы лабораторной установки. На последующих листах размещают таблицы, графики и расчеты. На последней странице записываются выводы по работе, ставится дата выполнения работы и роспись исполнителя. Все листы отчета склеиваются или сшиваются и нумеруются. Отчет по каждой лабораторной работе представляется отдельно.

Позиц. обозначения	Наименование	Кол.	Примечание
20	110	10	45

Рисунок 1. Форма таблицы «Перечень элементов схемы лабораторной установки»

Кроме перечня элементов схемы лабораторной установки в отчете приводятся основные технические данные оборудования, выписанные из его паспортного щитка или из данных, приведенных в перечне элементов схемы лабораторной установки или на лабораторном столе, которые необходимы для дополнительных расчетов.

Схемы и график следует выполнять аккуратно, карандашом, с применением линейки, лекала, циркуля. Схемы и графики должны быть пронумерованы и содержать подрисовочные подписи.

Построение графиков можно выполнять на листах в клеточку, но лучше всего выполнять их на миллиметровой бумаге. Масштаб нужно выбирать таким образом, чтобы в принятой единице длины содержалось 1, 2 или 5 измеряемых величин или их десятых долей. По экспериментальным данным наносятся точки в виде кружков, треугольников или звездочек (для каждой функции свой обозначения), через которое проводится плавная, усредненная кривая. На одном графике допускается изображать несколько различных функций одного и того же аргумента (обычно – не более трех). При этом масштабы выбираются таким образом, чтобы кривые разместились равномерно по всему полю рисунка. Для каждого графика ось функции наносится отдельно с указанием размерности, например, для момента M , Н·м. Вдоль осей проставляются размерные единицы, причем цифровые значения осей в выполняемых работах обычно начинаются с нуля. Для построения графиков рекомендуется использовать программу MS Excel.

2009

2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

2.1. Измерение частоты вращения электродвигателей

Необходимость в измерении частоты вращения электродвигателей возникает при исследовании их механических характеристик и во многих других случаях. От цели опыта зависит точность измерения и то, какие средства измерения будут использованы. Например, для измерения частоты вращения электродвигателей малой мощности наиболее приемлемым является *стробоскопический метод*, не создающий тормозного момента на валу электродвигателя. При этом способе вращающийся вал, полумуфта или другая закрепленная на валу двигателя деталь, имеющая заранее нанесенную метку, освещается газоразрядной лампой, которая питается от регулируемого генератора импульсов. Регулируя частоту импульсов, добиваются, чтобы метка на валу, освещаемая лампой, казалась неподвижной. В это время делают отсчет по шкале прибора. Этот способ хорош тем, что не требует механической связи с валом.

В лаборатории электропривода для измерения частоты вращения широко используются *магнитоиндукционные тахометры и электрические индукционные тахометры*.

Магнитоиндукционные тахометры не предназначены для дистанционного измерения, поэтому шкала этих приборов находится в одном корпусе с преобразователем, непосредственно у места присоединения тахометра к валу испытуемого электродвигателя.

Преобразование скорости вала в угловое перемещение стрелки магнитоиндукционным измерительным узлом основано на взаимодействии магнитного поля вращающихся магнитов с индукционными токами, наведенными этим полем в чувствительном элементе.

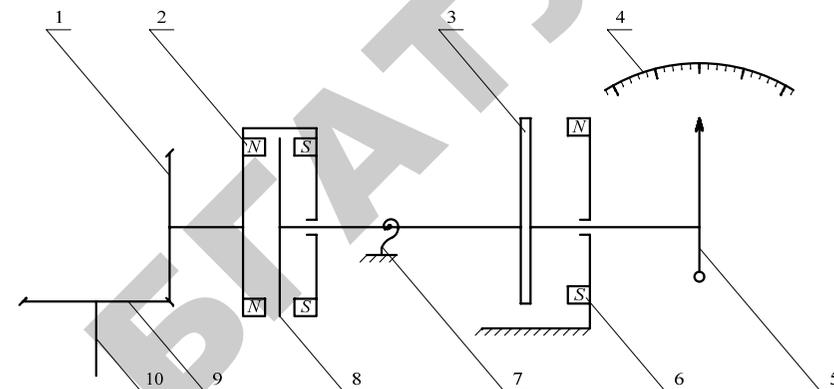


Рисунок 2. Принципиальная электрическая схема магнитоиндукционного тахометра: 1, 9 – конические шестерни; 2 – магнитный узел; 3 – демпфер; 4 – шкала; 5 – стрелка прибора; 6 – неподвижные магниты; 7 – спиральная пружина; 8 – чувствительный элемент; 10 – входной вал тахометра

При вращении вала тахометра 10 (рисунок 2) через конические шестерни 1 и 9 получает вращение магнитный узел 2. Образуется вращающееся магнитное поле, которое индуцирует в чувствительном элементе 8 вихревые потоки. В результате взаимодействия магнитного поля вращающихся магнитов с индукционными токами чувствительного элемента возникает вращающий момент. Вращающему моменту чувствительного элемента 8 противодействует момент спиральной пружины 7, укрепленной на оси этого элемента. Так как момент спиральной пружины пропорционален углу ее закручивания, то угол поворота чувствительного элемента пропорционален оборотам магнитного узла и соответственно оборотам вала электродвигателя. На другом конце оси чувствительного элемента укреплена стрелка 5, показывающая на равномерной шкале 4 число оборотов вала двигателя.

Для повышения устойчивости стрелки и улучшения отсчета показаний прибора применено демпфирование подвижной системы тахометра. При движении подвижной системы магнитный поток магнитов 6 наводит в алюминиевом диске демфера 3 вихревые потоки, в результате взаимодействия которых с магнитным потоком магнитов получается тормозящий момент. Допустимая погрешность тахометра в пределах рабочего диапазона $\pm 1\%$.

Электрические индукционные тахометры предназначены для дистанционного измерения частоты вращения вала объекта. Рассмотрим принцип их работы на примере малогабаритного электрического тахометра ТЭ1-3м.

Комплект тахометра состоит из датчика (генератора переменного трехфазного тока) и магнитоиндукционного измерителя.

Дистанционное измерение частоты вращения электрическим тахометром основано на принципе дистанционной электрической передачи вращения вала двигателя к валу магнитоиндукционного измерительного узла измерителя, а также преобразования частоты вращения измерительного вала в угловые перемещения стрелки магнитоиндукционного измерительного узла. Принципиальная схема электрического индукционного тахометра приведена на рисунке 3.

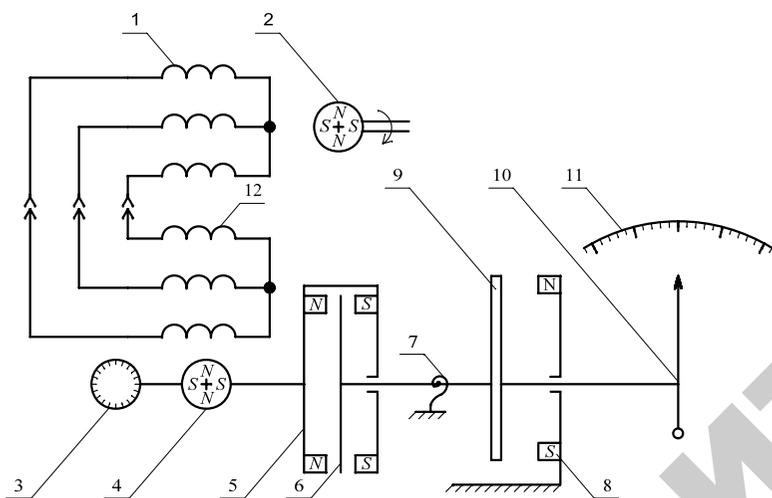


Рисунок 3. Принципиальная схема электрического индукционного тахометра:
 1 – статор датчика; 2 – ротор датчика; 3 – гистерезисный ротор (диск); 4 – ротор измерителя; 5 – магнитный узел измерителя; 6 – чувствительный элемент;
 7 – противодействующая пружина; 8 – магниты; 9 – алюминиевый диск;
 10 – стрелка; 11 – шкала; 12 – статор измерителя

При вращении ротора 2, представляющего четырехполюсный магнит, в обмотке статора датчика 1 возбуждается трехфазная ЭДС частотой, пропорциональной частоте вращения ротора. Подсоединение измерителя к датчику вызывает ток, который по трем прово-

дам подводится к обмоткам статора 12 синхронного мотора измерителя. Трехфазная система подведенного тока вызывает вращающееся магнитное поле, частота вращения которого пропорциональна частоте вращения вала датчика. Ротор мотора измерителя вращается со скоростью, синхронной вращению магнитного поля, благодаря наличию постоянных магнитов 4 на роторе измерителя и гистерезисных дисков 3. Последние помогают раскручиваться ротору до оборотов, при которых постоянные магниты сами успевают взаимодействовать с вращающимся полем статора. На конце вала ротора укреплен магнитный узел 5, имеющий шесть пар полюсов постоянных магнитов, между которыми установлен чувствительный элемент 6. При вращении магнитного узла в этом элементе индуктируются вихревые потоки. В результате их взаимодействия с магнитным полем магнитного узла создается вращающийся момент чувствительного элемента, пропорциональный частоте вращения магнитного узла.

Вращающему элементу чувствительного элемента противодействует момент спиральной пружины 7, укрепленной на оси этого элемента. Так как момент спиральной пружины пропорционален углу ее закручивания, то угол поворота чувствительного элемента пропорционален оборотам магнитного узла и, соответственно, оборотам вала двигателя. На другом конце чувствительного элемента укреплена стрелка 10, показывающая по равномерной шкале 11 измерителя частоту вращения вала электродвигателя. Для повышения устойчивости стрелки и улучшения отсчета показаний приборов применено демпфирование подвижной системы измерителя. При движении этой системы магнитный поток магнитов 8 наводит в алюминиевом диске 9 вихревые токи, в результате взаимодействия которых с магнитным потоком магнитов подвижная система получает тормозящий момент.

Для измерения частоты вращения в лаборатории и в приводах с обратными связями широко используются **тахогенераторы постоянного тока**. Известно, что при неизменном магнитном потоке Φ полюсов ЭДС якоря E генератора пропорциональна угловой скорости ω , т.е. $E = k \omega \Phi$, где k – коэффициент пропорциональности. Удобно использовать тахогенераторы с постоянными магнитами. В качестве измерителя используются вольтметры, шкала которых проградуирована в мин^{-1} .

Во всех случаях при изменении частоты вращения следует обращать внимание на шкалу прибора и доску, на которой закреплен

индикатор тахометра. В связи с применением передач от вала испытуемого электродвигателя к тахогенератору или по причине внутреннего устройства некоторые измерители имеют переводной коэффициент, который следует учитывать при измерениях.

2.2. Создание нагрузки, измерение момента и определение мощности на валу электродвигателей

В лаборатории нагрузку на валу испытуемого электродвигателя создают при помощи электромагнитного тормоза или электрической машины постоянного тока, соединенной с валом двигателя.

Устройство электромагнитного тормоза показано на рисунке 4. На вал испытуемого электродвигателя насажен стальной диск 2 (для малых машин может быть медный или алюминиевый). Диск помещен между полюсными наконечниками 9 электромагнитов 7. Система электромагнитов укреплена на оси 6, которая может вращаться в подшипниках 5, помещенных в стойке 1. На этой же оси укреплены груз 2 и стрелка 3. На стойке неподвижно закреплена шкала 4. При подаче постоянного тока в обмотку возбуждения создается магнитное поле, имеющее в данной конструкции (рисунок 5) два северных или два южных полюса. Поле замыкается через стальной диск 2.

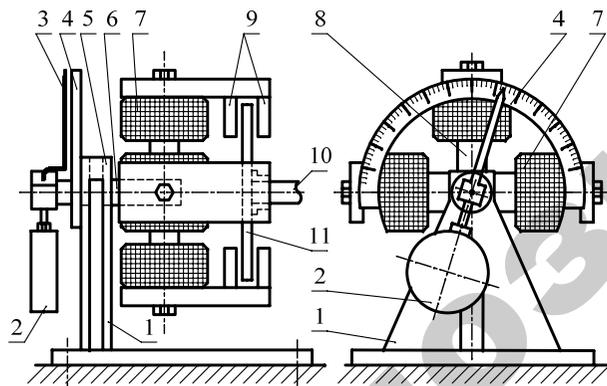


Рисунок 4. Электромагнитный тормоз:

1 – стойка; 2 – груз; 3 – стрелка; 4 – шкала; 5 – подшипники; 6 – ось электромагнитов; 7 – обмотка электромагнита; 8 – сердечник электромагнита; 9 – полюсные наконечники электромагнита; 10 – вал испытуемого двигателя; 11 – стальной диск

При вращении вала двигателя диск тормоза вращается в магнитной области и в диске наводятся вихревые токи. Взаимодействие вихревых токов диска с магнитным полем создает момент, который стремится затормозить диск. Этот же момент заставляет поворачиваться в сторону вращения диска всю систему электромагнитов и груз, пока момент груза не уравновесит его. Поскольку двигатель вращается в установившемся режиме, то момент двигателя на валу равен тормозному моменту. Отсчет момента производится по заранее отградуированной шкале.

В лаборатории используется шкала двух масштабов. Большой масштаб соответствует четырем дискам груза, меньший – двум дискам груза. Тормоз позволяет плавно и в широких пределах изменять нагрузку на валу двигателя путем изменения величины постоянного тока, протекающего по обмоткам электромагнита.

Для создания нагрузки на валу электродвигателя в лаборатории используется также **генератор постоянного тока с независимым возбуждением** или двигатель, работающий как генератор. Валы генератора и испытуемого двигателя соединяются муфтой. Якорь генератора подсоединяется к нагрузочному резистору R_n , в качестве которого чаще всего используется ламповый реостат, а обмотка возбуждения – к источнику постоянного тока (рисунок 5).

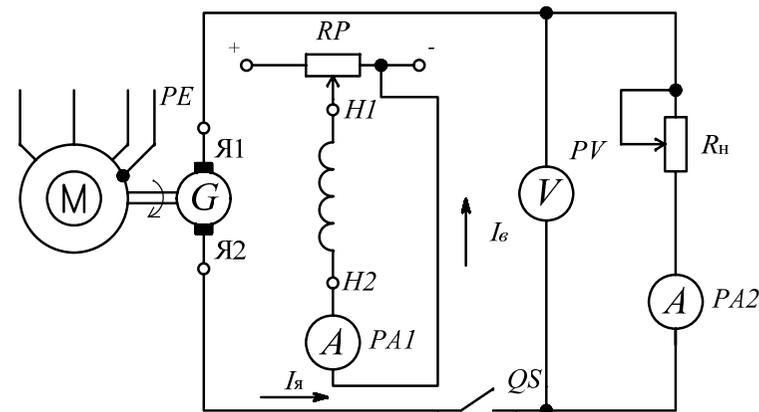


Рисунок 5. Схема включения генератора постоянного тока независимого возбуждения для испытания электродвигателя M под нагрузкой

При включении обмотки возбуждения в сеть и вращении испытуемого двигателя M в якоре генератора индуцируется ЭДС. Включение выключателя QS вызывает ток в цепи якоря и, следовательно, появление момента на валу машины от взаимодействия магнитного поля с током якоря. Для испытуемого электродвигателя этот момент будет тормозной. Изменяя величину сопротивления R_n , при некотором $I_b = \text{const}$ можно создать различную нагрузку на валу испытуемого электродвигателя (рисунок 6).

Для численного определения момента на валу генератор предварительно тарируют. Для этого его запускают вхолостую и при неизменном и максимальном токе возбуждения снимают зависимость тока холостого хода от частоты вращения $I_0 = f(\omega)$.

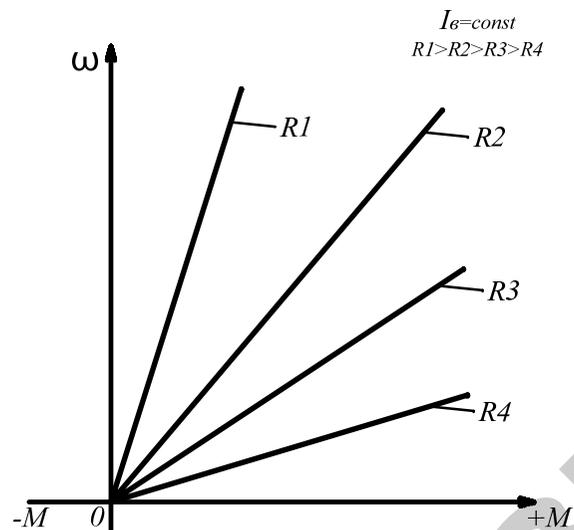


Рисунок 6. Механическая характеристика электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения, работающего генератором по схеме рисунка 4, при различных значениях сопротивления нагрузки

При тарировке генератора на холостом ходу различную частоту вращения получают путем изменения напряжения на якоре генератора.

В дальнейшем при использовании тарированного генератора ток возбуждения поддерживают равным току возбуждения при тари-

ровке на холостом ходу. Так как в машине постоянного тока при неизменном магнитном потоке вращающий момент пропорционален току якоря, то момент исследуемого двигателя

$$M = K (I_0 + I_{\text{я}}); \quad (1)$$

$$K = \frac{U_n - I_n R_{\text{я}}}{\omega_n}, \quad (2)$$

где U_n – номинальное напряжение якоря, В;

I_n – номинальный ток якоря, А;

ω_n – номинальная угловая скорость вращения якоря, рад/с;

$I_{\text{я}}$ – ток якоря во время опыта, А;

$R_{\text{я}}$ – сопротивление якоря, Ом; сопротивление измеряют или находят по формуле:

$$R_{\text{я}} = 0,5 \frac{U_n}{I_n} (1 - \eta_n), \quad (3)$$

где η_n – номинальный КПД генератора.

Для определения момента на валу измеряют только ток якоря и частоту вращения. Далее пользуются графиком $I_0 = f(\omega)$ и формулой (1).

В том случае, если необходимо определить мощность или момент на валу электродвигателя, соединенного не с генератором, а с рабочей машиной, например, с вентилятором, момент на валу находят расчетным путем. Предварительно электродвигатель тарируют на холостом ходу и сроят зависимость $\Delta P_{\text{xx}} = f(\omega)$.

Потери холостого хода, включающие механические потери и потери в стали, при тарировке находят расчетом:

$$\Delta P_{\text{xx}} = U_{\text{я}} I_{\text{я}} - I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} - \Delta P_{\text{щ}}, \quad (4)$$

где $P_{\text{щ}}$ – потери мощности в щеточных контактах, Вт;

$$\Delta P_{\text{щ}} = 2U_{\text{щ}} I_{\text{я}}, \quad (5)$$

где $U_{щ}$ – падение напряжения в переходном контакте щеток (на одну полярность). Для угольных и графитовых щеток $U_{щ} = 1$ В, для металлоугольных и металлографитовых – 0,3 В.

Зная зависимость $\Delta P_{xx} = f(\omega)$, для определения мощности на валу достаточно измерить напряжение на якоре, ток якоря и частоту вращения. Мощность на валу двигателя определяется расчетом

$$P_B = P_1 - \Delta P = P_1 - (\Delta P_M + \Delta P_{щ} + \Delta P_{xx} + \Delta P_{доб}), \quad (6)$$

где P_1 – потребляемая мощность, Вт, $P_1 = U_{я} I_{я}$;

ΔP_M – потери мощности в меди якоря, Вт; $P_M = I^2 R_{я}$;

$\Delta P_{щ}$ – потери в щетках двигателя, Вт;

$\Delta P_{доб}$ – потери добавочные, Вт; $P_{доб} = 0,01 P_1$;

ΔP_{xx} – потери холостого хода, Вт.

Момент на валу

$$M = P_B / \omega, \quad (7)$$

где ω – угловая скорость вала двигателя, рад/с.

$$\omega = \frac{\pi n}{30} \approx 0,1045 n, \quad (8)$$

где n – частота вращения вала, мин⁻¹.

Известны и другие устройства для создания и измерения моментов на валу электродвигателей, например балансирные машины. Более подробно устройства, методы создания и измерения моментов на валу электродвигателей изложены в литературе [1].

2.3. Рекомендации по выбору измерительных приборов, реостатов, проводов

Измерительные приборы к лабораторным работам, как правило, подбираются заранее и находятся на рабочих столах. Однако за одним столом может проводиться несколько разных лабораторных работ. В этом случае возникает вопрос о выборе нужных измерительных приборов. Приборы выбирают, в первую очередь, по роду тока и пределам измерения.

Род тока определяется электрической схемой, из которой выясняется, в цепях какого тока установлен прибор.

Пределы измерения устанавливаются только после выяснения режимов работы оборудования в опыте и паспортных данных испытуемых машин и аппаратов, включенных в схему. Например, для испытания асинхронного электродвигателя на холостом ходу требуется амперметр на ток, близкий или равный номинальному.

Для измерения пусковых токов требуется амперметр на ток, в 7...10 раз превышающий номинальный.

При выборе прибора следует внимательно осмотреть его шкалу. Часто шкалы амперметра или ваттметра градуируются с учетом включения прибора через трансформатор тока. Такие приборы обязательно имеют на шкале условное обозначение в виде букв и цифровой дроби, например ТТ 40/5. Это означает, что прибор включается через трансформатор тока 40 на 5 А.

В лаборатории используются **реостаты** ограничивающие (пусковые), нагрузочные и регулировочные.

Ограничивающие реостаты используются для уменьшения пускового тока якоря двигателя постоянного тока или ротора двигателя с фазным ротором. Как правило, их включают только на время пуска, а при работе полностью выводят, т.е. шунтируют. Для пуска двигателей применяют специальные реостаты, называемые пусковыми.

При необходимости выбрать ползунковый реостат для ограничения пускового тока двигателя постоянного тока величину сопротивления R принимают $R \approx U_n / 2 I_n$, а допустимый ток реостата не менее I_n двигателя. Точный расчет пусковых сопротивлений изучается на практических занятиях.

Регулировочные реостаты применяются для регулирования тока и напряжения в электрических машинах или в измерительных схемах. Реостаты, включаемые в главные (силовоточные) цепи электрических машин, рассчитаны на длительное протекание рабочих (номинальных) токов. По конструктивному исполнению они могут быть различными. Чаще всего это спирали или зигзагообразные пластины из нихрома или константана, а для больших машин – стандартные ящики сопротивлений с чугунными или фехралевыми элементами. В лаборатории наибольшее применение имеют проволочные движковые реостаты со скользящим контактом (их называют ползунковыми). На реостате указывается номинальное сопротивление и наибольший длительный допустимый ток. Реостаты выбирают по этим параметрам.

Для регулирования тока реостат включается в цепь последовательно (рисунок 7, а, б). Схему рисунка 7, б применяют в том случае, когда разрыв цепи, в которую включен реостат, недопустим. Например, недопустим разрыв цепи возбуждения работающего двигателя постоянного тока: при разрыве цепи возбуждения магнитный поток исчезает, ЭДС якоря стремится к нулю, ток якоря и частота вращения двигателя возрастают до недопустимых значений.

Для плавного регулирования напряжения реостата его включают по схеме делителя напряжения (рисунок 7, в). Для такого включения необходимо, чтобы произведение номинального сопротивления реостата $R_{рн}$ на его максимальный допустимый ток $I_{рн}$ было больше напряжение сети U_c , т.е. $R_{рн} \times I_{рн} \leq U_c$. Кроме того, номинальный ток реостата должен быть больше суммы токов I_0 и I_2 (см. рисунок 7, в).

Регулировочные реостаты перед опытом устанавливают в положение, указанное в методических указаниях к лабораторным работам. Обычно сопротивление в цепях якоря устанавливают максимальное, а в цепях возбуждения двигателя – равным нулю.

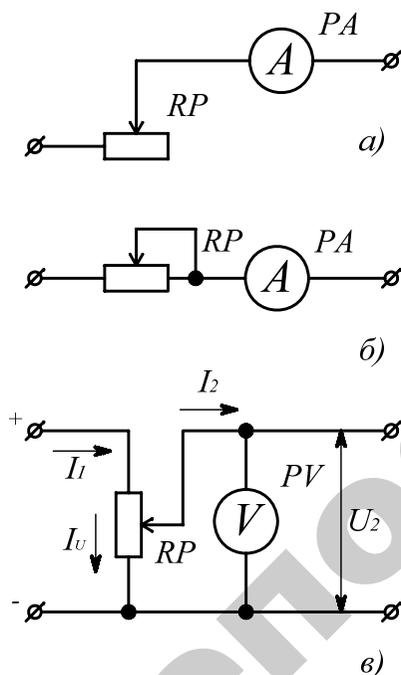


Рисунок 7. Схемы включения реостатов для регулирования тока (а, б) и напряжения (в)

Нагрузочные реостаты служат для регулирования рабочих токов нагрузочных генераторов. Они рассчитаны на длительный ток и аналогичны регулировочным реостатам, включаемым в главные цепи электрических машин.

Для генераторов малой мощности широко используются **ламповые реостаты**. Они представляют собой набор ламп, включенных параллельно или последовательно-параллельно и снабженных выключателями.

Нагрузочные реостаты перед опытом обычно отключают, а затем в процессе испытаний включают так, чтобы нагрузочный ток постепенно возрастал.

Провода для сборки схемы следует выбирать только с исправной изоляцией и с наконечниками.

Сечение проводов F выбирается в зависимости от величины тока. Руководствуются следующими соотношениями:

- 1) для цепей с током до 15 А $F \geq 2,5 \text{ мм}^2$;
- 2) для цепей с током 15–30 А $F \geq 4 \text{ мм}^2$;
- 3) для цепей с током 30–50 А $F \geq 6 \text{ мм}^2$.

Наиболее тонкие провода используются для цепей вольтметров, цепей схемы управления, обмоток возбуждения, более толстые – для главных цепей электрических машин (цепи якоря, статора, ротора).

2.4. Маркировка обмоток электродвигателей

Буквенные обозначения обмоток электрических машин следующие: Я1, Я2 – обмотка якоря; Ш1, Ш2 – параллельная (шунтовая); С1, С2 – последовательная (сериесная); Д1, Д2 – дополнительных полюсов; Н1, Н2 – независимая обмотка возбуждения двигателя постоянного тока; С1, С2, С3, С4, С5, С6 – статора двигателя переменного тока; Р1, Р2, Р3 – ротора двигателя переменного тока; С1, С2 – рабочая обмотка однофазного электродвигателя переменного тока; П1, П2 – пусковая обмотка однофазного электродвигателя. Цифра 1 соответствует условному началу обмотки, цифра 2 – условному концу. Исключение – С1, С2, С3 – начала обмотки, С4, С5, С6 – концы обмотки статора.

Маркировка обмоток электрических машин изображена на рисунке 8.

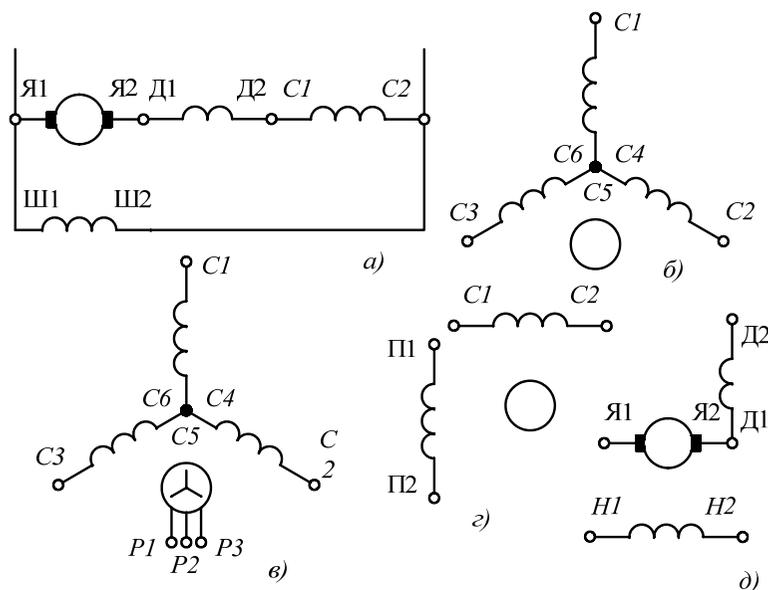


Рисунок 8 – Маркировка обмоток электрических машин:
 а) – постоянного тока смешанного возбуждения; б) – трехфазного асинхронного с короткозамкнутым ротором; в) – трехфазного асинхронного с короткозамкнутым ротором; г) – однофазного переменного тока с пусковой обмоткой ПП2;
 д) – постоянного тока независимого возбуждения

3. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ВЕНТИЛЯТОРА ОПЫТНЫМ ПУТЕМ

Общее время занятий – 2 часа

Мотивационная характеристика темы

Вентиляторы – самые распространенные рабочие машины на производстве. Знание характеристик вентиляторов позволяет успешно их эксплуатировать и правильно подбирать электродвигатель для их привода. Поэтому тема занятия актуальна для будущих инженеров-электриков.

Цели занятия

1. Освоить методику определения опытным путем механической характеристики центрального вентилятора.
2. Исследовать опытным путем изменения параметров электропривода центробежного вентилятора при регулировании подачи воздуха задвижкой на трубопроводе.

Задачи занятия

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Собрать принципиальную электрическую схему лабораторной установки.
3. Выполнить опыты для определения механической характеристики вентилятора $M_c = f(\omega)$.
4. Опытным путем определить изменения параметров электропривода вентилятора при закрытии задвижки на воздуховоде и постоянной частоте вращения электродвигателя.

Задание для самоподготовки

1. Изучить по учебнику [2, с. 32] возможные виды механических характеристик рабочих машин и уравнение, описывающее эти характеристики.
2. Ознакомиться с содержанием приложения 1.
3. Ответить в письменном виде на следующие вопросы:

- каким уравнением описывается механическая характеристика вентилятора?
- нарисуйте аэродинамическую характеристику вентилятора при одной частоте вращения [3, с. 52 или 62];
- запишите формулу, по которой определяется мощность электродвигателя для привода вентилятора.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из центробежного вентилятора, рабочее колесо которого насажено на вал электродвигателя постоянного тока ПН-10 независимого возбуждения. Якорь электродвигателя получает питание от автотрансформатора *TV* через выпрямитель *UZ2*, а обмотки возбуждения – от сети переменного тока через выпрямитель *UZ1*. Скорость возбужденного потока измеряется электронным анемометром *PS*. Частота вращения колеса вентилятора измеряется индукционным тахометром *BR*.

Параметры электродвигателя:

ПН-10; $U_n = 220$ В; $I_n = 5,8$ А; $P_n = 0,95$ кВт; $n_n = 1450$ мин⁻¹; масса 75 кг; $R_{\text{я}} = 2,53$ Ом; $R_{\text{доб. пол.}} = 0,615$ Ом; $R_{\text{парал.}} = 476$ Ом; $R_{\text{посл.}} = 0,405$ Ом.

Таблица 1.1 – Перечень элементов схемы лабораторной установки

Позиционные обозначения	Наименование	Кол-во	Примечания
<i>QF1</i>	Автоматический выключатель АЕ2033	1	$I_{\text{н.р.}} = 4$ А
<i>TV</i>	Автотрансформатор РНО-250-10	1	$I_n = 40$ А
<i>M</i>	Электродвигатель ПН-10	1	$P_n = 0,95$ кВт, $I_n = 5,8$ А
<i>PA</i>	Амперметр М366	1	Шкала 7,5 А
<i>PV</i>	Вольтметр М367	1	10 В
<i>BR</i>	Тахометр ТМ-3	1	Цена деления 50 мин ⁻¹
<i>PS</i>	Электронный анемометр АП1	1	-
<i>HL1, HL2</i>	Сигнальная арматура (изготовлена в лаборатории)	2	-
<i>UZ1, UZ2</i>	Выпрямитель (изготовлен в лаборатории)	2	-

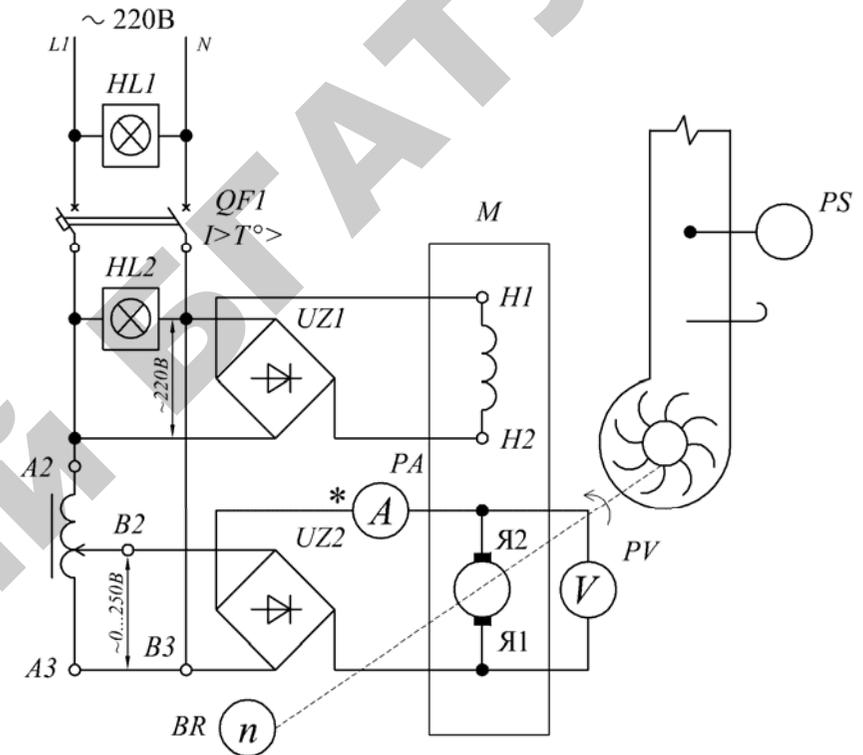


Рисунок 1.1. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

Методические указания

К задаче 2

Амперметр *PA* включить на предел 7,5 А. Автотрансформатор подключить строго по схеме (вход – на *A2 A3*, выход – на *B2 B3*).

К задаче 3

Поскольку механическая характеристика вентилятора есть зависимость момента сопротивления движения вала от угловой скорости вращения, то необходимо задавать различную скорость вращения и расчетом определять момент на валу (момент сопротивления движению).

Скорость вращения задается путем изменения напряжения на зажимах якоря электродвигателя с помощью автотрансформатора *TV*.

- Для получения минимальной скорости вращения ручку автотрансформатора установить в крайнее левое положение, соответствующее минимальному напряжению.

- Полностью открыть заслонку на воздуховоде.

- Повышать напряжение на якоре электродвигателя с помощью автотрансформатора. Вначале установить частоту вращения 300 мин^{-1} . Обратить внимание на направление вращения колеса вентилятора (по стрелке на его корпусе) и тахометра *BR*.

- Записать по форме таблицы 1.2 показания всех электроизмерительных приборов и электронного анемометра (опыт 1).

- Аналогично проделать опыт при частоте вращения вентилятора $500, 700, 900, 1000 \text{ мин}^{-1}$ (опыты 2–5). Не отключая установку, перейти к выполнению пункта 3.4. программы испытаний.

К задаче 4

- Не изменяя частоты вращения электродвигателя (1000 мин^{-1}), закрыть задвижку на $\frac{1}{4}$ сечения. Записать показания приборов (опыт 6).

- Закрыть задвижку на $\frac{1}{2}$ сечения, поддерживая частоту вращения электродвигателя 1000 мин^{-1} , записать показания приборов (опыт 7).

- Закрыть задвижку на $\frac{3}{4}$ сечения, поддерживая частоту вращения электродвигателя 1000 мин^{-1} . Записать показания приборов (опыт 8).

- Закрыть задвижку полностью, поддерживая частоту вращения электродвигателя 1000 мин^{-1} . Записать показания приборов (опыт 9).

Таблица 1.2 – Данные измерений и результаты расчетов

Номер опыта	Измерено				Вычислено									Положение задвижки
	n , мин ⁻¹	$I_{я}$, А	$U_{я}$, В	V , м/с	ω , с ⁻¹	$P_{я}$, Вт	$\Delta P_{м}$, Вт	$\Delta P_{доб}$, Вт	$\Delta P_{х}$, Вт	$\Delta P_{щег}$, Вт	$\Sigma \Delta P$, Вт	M_c , Н·м	Q , м ³ /с	
1	300													Открыта
2	500													Открыта
3	700													Открыта
4	900													Открыта
5	1000													Открыта
6	1000													Закрыто 25% сечения
7	1000													Закрыто 50% сечения
8	1000													Закрыто 75% сечения
9	1000													Закрыто 100% сечения

Расчетные формулы к таблице 1.2

Угловая скорость вала вентилятора (рад/с):

$$\omega = \frac{\pi n}{30} \approx 0,1045n. \quad (1.1)$$

Мощность, потребляемая якорем двигателя:

$$P_{\text{я}} = U_{\text{я}} I_{\text{я}}. \quad (1.2)$$

Потери мощности в обмотке якоря (Вт):

$$\Delta P_{\text{м}} = I_{\text{я}}^2 (R_{\text{я}} + R_{\text{д.п.}}), \quad (1.3)$$

где $R_{\text{я}}$, $R_{\text{д.п.}}$ – сопротивления обмотки якоря и дополнительных полюсов (из паспорта электродвигателя), Ом.

Добавочные потери (Вт):

$$\Delta P_{\text{доб}} = 0,01P_1. \quad (1.4)$$

Потери холостого хода (Вт) принимаются по ранее тарированной кривой потерь электродвигателя $\Delta P_{\text{х}} = f(n)$ (рисунок 1.2).

Потери в щетках двигателя (Вт):

$$\Delta P_{\text{щет}} = \Delta U I_{\text{я}}, \quad (1.5)$$

где $\Delta U = 2$ В – падение напряжения в щеточном контакте, В.

Сумма потерь в электродвигателе:

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{х}} + \Delta P_{\text{щет}}. \quad (1.6)$$

Мощность на валу вентилятора (Вт):

$$P_{\text{в}} = P_{\text{я}} - \Sigma \Delta P. \quad (1.7)$$

Момент сопротивления вентилятора (Н·м):

$$M_{\text{с}} = \frac{P_{\text{в}}}{\omega}. \quad (1.8)$$

Подача вентилятора ($\text{м}^3/\text{ч}$):

$$Q = Fv, \quad (1.9)$$

где $F = 0,04 \text{ м}^2$ (площадь выходного сечения воздуховода).

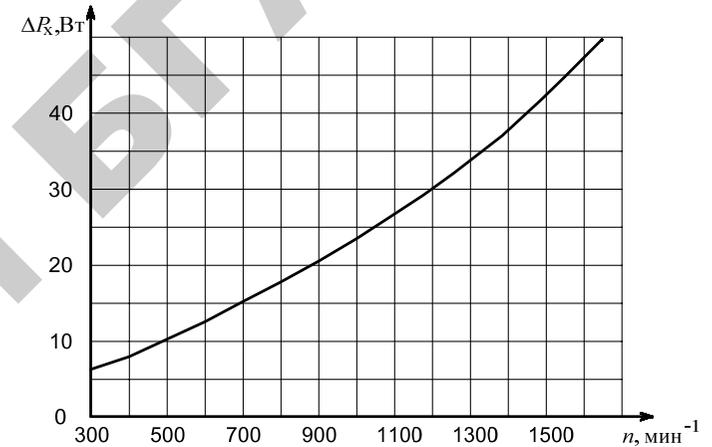


Рисунок 1.2. Зависимость потерь холостого хода электродвигателя ПН-10 от частоты вращения

Содержание отчета

- Цель работы.
- Принципиальная электрическая схема лабораторной установки и таблица 1.1.
- Ответы в (письменном виде) на вопросы самоподготовки.
- Таблица 1.2.
- Графики $M_{\text{с}} = f(\omega)$, $P_{\text{в}} = \varphi(\omega)$, $Q = f(\omega)$.
- Найти показатель степени изменения опытной зависимости $M_{\text{с}} = f(\omega)$, записанной в виде $M_{\text{с}} = \omega^{K_1}$:

$$K_1 = \frac{\ln M_{\text{с}1} / M_{\text{с}2}}{\ln \omega_1 / \omega_2}, \quad (1.10)$$

где ω_1 , $M_{\text{с}1}$ – угловая скорость и момент сопротивления, соответствующие частоте вращения 1000 мин^{-1} ;

ω_2, M_{c2} – угловая скорость и момент сопротивления, соответствующие частоте вращения 500 мин^{-1} ; взять эти данные из графика $M_c = f(\omega)$ или таблицы 1.2.

• Найти показатель степени изменения опытной зависимости $P_c = f(\omega)$, записанной в виде $P_c = \omega^k$:

$$K_2 = \frac{\ln P_{c1} / P_{c2}}{\ln \omega_1 / \omega_2}, \quad (1.11)$$

где ω_1, P_{c1} – угловая скорость и мощность на валу вентилятора, соответствующие частоте вращения 1000 мин^{-1} ;

ω_2, P_{c2} – угловая скорость и мощность на валу вентилятора, соответствующие частоте вращения 500 мин^{-1} ; взять эти данные из графика $P_c = f(\omega)$ или таблицы 1.2.

- Сравнить опытные значения K_1 и K_2 с теоретическими значениями K_1 и K_2 .
- Графики $P_1 = f_1(Q)$, $M_c = f_3(Q)$, $P_v = f_2(Q)$ при постоянной частоте вращения электродвигателя.
- Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Как зависят мощность и момент сопротивления вентилятора от частоты вращения?
2. В какое положение надо поставить задвижку на воздуховоде для облегчения запуска центробежного вентилятора?
3. Изложите методику снятия механической характеристики вентилятора. Какое оборудование необходимо для этого случая?
4. Вышел из строя электродвигатель центробежного вентилятора. Параметры электродвигателя: $P_n = 1,1 \text{ кВт}$, $n_n = 900 \text{ мин}^{-1}$. В хозяйстве имеются электродвигатели на 1400 мин^{-1} . Какой мощности надо взять электродвигатель для привода вентилятора с частотой вращения 1400 мин^{-1} ?
5. Технолог поставил задание увеличить производительность вентиляционной установки в 1,5 раза. Электродвигатель имел мощность на валу 1 кВт при $n_n = 900 \text{ мин}^{-1}$. Какой новый электродвигатель по мощности и частоте вращения надо взять для привода вентилятора? Во сколько раз увеличатся подача и давление вентиляционной установки?

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПРИ РАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ

Общее время занятий – 2 часа

Мотивационная характеристика темы

Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором нашли широкое применение в сельском хозяйстве. Знание их характеристик позволяет правильно их эксплуатировать. Поэтому тема занятия актуальна для будущих инженеров-электриков.

Цели занятия

1. Опытным путем определить механические и электромеханические характеристики асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.
2. Исследовать влияние напряжения на механические и электромеханические характеристики асинхронного электродвигателя.

Задачи занятия

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Собрать принципиальную электрическую схему установки, рисунок 2.1.
3. Опытным путем получить данные для построения механических и электромеханических характеристик электродвигателя при напряжении питания 120 В .
4. Прodelать опыты пункта 3 при напряжении питания 160 В .
5. Прodelать опыты пункта 3 при напряжении питания 200 В .

Задание для самоподготовки

1. Изучить по учебнику [2, с. 75, с. 153] уравнение механической характеристики асинхронного электродвигателя, а так же влияние напряжения на момент и ток асинхронного электродвигателя.
2. Познакомиться с приложением 2. Ответить в письменном виде на следующие вопросы:

- уменьшается ли частота вращения магнитного поля при уменьшении напряжения питания асинхронного электродвигателя?
- зависит ли критическое скольжение ротора электродвигателя от напряжения его питания?
- какие зависимости называют механическими и электромеханическими характеристиками?

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из трехфазного регулятора напряжений типа ТС-6, асинхронного электродвигателя и электромагнитного тормоза, создающего момент на валу электродвигателя.

Изменение момента осуществляется путем регулирования тока в цепи возбуждения тормоза с помощью потенциометра RP . Частота вращения измеряется тахометром, присоединенным к валу электродвигателя.

Технические данные электродвигателя: тип А41-6; $P_n = 1$ кВт; $U_n = 220/380$ В; Δ/Y ; $n_n = 930$ мин⁻¹; $\eta = 77$ %; $n_n = 1450$ мин⁻¹; $\cos\phi_n = 0,72$; $K_i = 5,5$; $\mu_n = 1,8$; $\mu_k = 2,2$; $I_{рот.дв.} = 0,017$ кгм²; $I_{max} = 0,128$ кгм².

Методические указания

К задаче 2

При сборке схемы обратите внимание, что автотрансформатор включается в сеть после автоматического выключателя $QF1$, закрепленного в ящике на стене. Его выходное напряжение подано на вход автоматического выключателя $QF2$. Туда же подключен вольтметр PV . Обмотка электродвигателя должна быть соединена в схему Δ "треугольник".

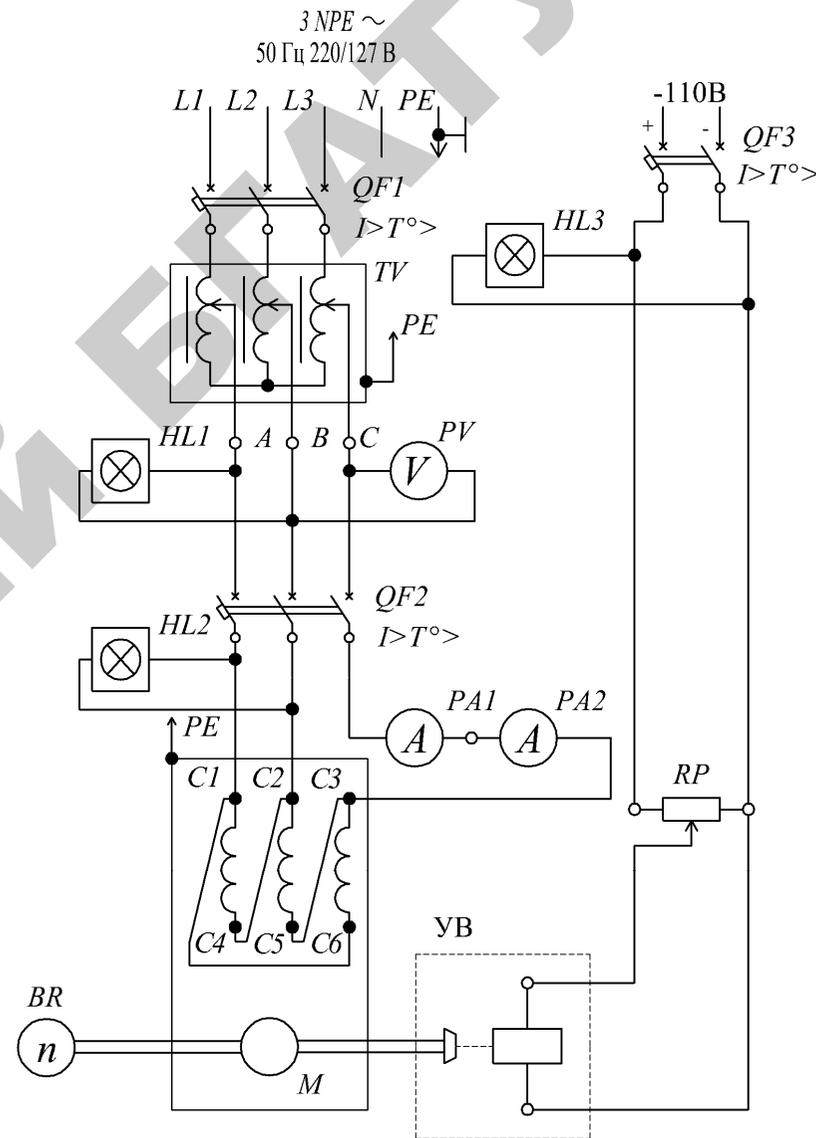


Рисунок 2.1. Принципиальная схема лабораторной установки для исследования работы асинхронного электродвигателя при разных напряжениях

Таблица 2.1 – Перечень элементов схемы лабораторной установки

Позиционные обозначения	Наименование	Кол-во	Примечания
<i>QF1</i>	Автоматический выключатель АД-14	1	$I_n = 25$ А тип С
<i>QF2</i>	Автоматический выключатель АЕ2025	1	$I_n = 5$ А
<i>QF3</i>	Автоматический выключатель ВА47-29	1	$I_n = 10$ А тип С
<i>TV</i>	Трехфазный автотрансформатор ТС – 6	1	$S_n = 6$ кВА
<i>M</i>	Электродвигатель А41-4	1	$P_n = 1$ кВт
<i>PV</i>	Вольтметр Э365-1	1	500 В
<i>PA1</i>	Амперметр Э365-1	1	3 А
УВ	Электромагнитный тормоз ЭТ-1	1	–
<i>PA2</i>	Амперметр Э365-1	1	20 А
<i>BR</i>	Тахометр ТМЗ-П	1	50 мин ⁻¹ /дел
<i>RP</i>	Лабораторный реостат РПШ-1	1	200 Ом, 1 А

К задаче 3

Осуществить пуск электродвигателя. Для этого включить автотрансформаторный регулятор напряжения *TV* и установить на выходе напряжение, равное 120 В. Затем включить электродвигатель автоматическим выключателем *QF2*.

Выполнить опыты для определения механических и электромеханических характеристик двигателя. Для этого записать по форме таблицы 2.2 показания измерительных приборов при холостом ходе агрегата (*опыт 1*).

Затем включить с помощью автоматического выключателя *QF3* цепь катушки электромагнитного тормоза УВ, и с помощью резистора *RP* установить различные тормозные моменты так, чтобы частота вращения составляла 900 мин⁻¹ (*опыт 2*), 850 мин⁻¹ (*опыт 3*), 800 мин⁻¹ (*опыт 4*). Во всех опытах напряжение на зажимах электродвигателя поддерживается 120 В. Максимальный момент зарегистрировать в

опыте 5, для чего после опыта 4 медленно увеличивать ток в цепи тормоза и на грани ползучести (ухода) скорости из устойчивого вращения записать показания момента и тока.

Для того чтобы измерить пусковой ток и момент (*опыт 6*), необходимо установить максимальным напряжением на обмотках электромагнитного тормоза, включить электродвигатель, придерживая рукой остов катушек тормоза от резкого поворота, и, плавно его отпустив, записать значения момента и тока двигателя. Замеры при неподвижном роторе нужно делать быстро; сразу после замера отключить электродвигатель от сети, а резистор *RP* перевести в нулевое положение.

Таблица 2.2 – Результаты опытов и расчетов

Номер опыта	Измерено				Вычислено	
	U_1 , В	I_1 , А	n , мин ⁻¹	M , Н·м	ω , рад/с	P_2 , Вт
1	120			0		
2	120		900			
3	120		850			
4	120		800			
5	120					
6	120		0			
1	160			0		
2	160		900			
3	160		850			
4	160		800			
5	160					
6	160		0			
1	200			0		
2	200		900			
3	200		850			
4	200		800			
5	200					
6	200		0			
1	220			0		
2	220		900			
3	220		850			
4	220		800			
5	220					
6	220		0			

К задаче 4

Установить напряжение **160 В** при отключенном двигателе и выполнить опыты, как в пункте 3.

К задаче 5

Установить напряжение, равным **200 В** и выполнить опыт, как в пункте 3.

Расчетные формулы к таблице 2.2:

$$\omega = 0,1045n; \quad (2.1)$$

$$P_2 = M\omega. \quad (2.2)$$

Расчетные формулы для пересчета момента и тока в опытах при $U = 200$ В на номинальное напряжение 220 В, при частоте вращения n , соответствующей $U = 200$ В:

$$M = M_{\text{опыта}} \left(\frac{220}{200} \right)^2, \quad (2.3)$$

$$I = I_{\text{опыта}} \left(\frac{220}{200} \right). \quad (2.4)$$

Расчетные формулы для построения механической характеристики асинхронного электродвигателя по характерным точкам.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Точка 1: } M = 0 \\ \omega = \omega_0 = 104,5 \text{ рад/с} \end{array} \right\}. \quad (2.5)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Точка 2: } M = M_n = \frac{P_n}{\omega_n} \\ \omega = \omega_n = 1045n_n \end{array} \right\}. \quad (2.6)$$

$$\text{Точка 3: } M = M_{\text{кр}} = M_n \cdot \mu_{\text{кр}}; \quad (2.7)$$

$$\omega_{\text{к}} = \omega_0(1 - S_{\text{кр}}); \quad (2.8)$$

$$S_{\text{кр}} = \frac{S_n \left[\mu_{\text{кр}} + \sqrt{\mu_{\text{кр}}^2 + 2S_n(\mu_{\text{кр}} - 1) - 1} \right]}{1 - 2S_n(\mu_{\text{кр}} - 1)}; \quad (2.9)$$

$$S_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0}. \quad (2.10)$$

$$\text{Точка 4: } M = M_{\text{мин}} = M \mu_{\text{мин}}, \quad (2.11)$$

$$\text{где } \mu_{\text{мин}} = 1,6;$$

$$\omega_{\text{мин}} = 0,15\omega_0. \quad (2.12)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Точка 5: } M = M_{\text{пуск}} = M_n \mu_{\text{пуск}} \\ \omega = 0 \end{array} \right\}. \quad (2.13)$$

Образец построения механической характеристики изображен в приложении 2 (рисунок П2.1).

Содержание отчета

- Цель работы.
- Принципиальная электрическая схема лабораторной установки и таблица 1.2.
- Ответы на вопросы самоподготовки.
- Таблица 2.2.
- Зависимости $\omega = f(M)$ для $U_1 = 120, 160, 200, 220$ В и естественная механическая характеристика, построенная по 5 точкам расчета (на одном графике).
- Зависимости $\omega = f(I_1)$ для $U_1 = 120, 160, 200, 220$ В (на одном графике).
- Определить показатель степени k в зависимости $M = U_1^k$, для чего при некоторой скорости ω найти моменты на характеристиках, соответствующих U_1 и U_2 (см. приложение 2).

$$K_2 = \frac{\ln M_1 / M_2}{\ln U_1 / U_2}. \quad (2.14)$$

Сравнить показатели степени K опытный и теоретический.

Контрольные вопросы

1. При напряжении 220 В (на фазу) электродвигатель развивает момент 12 Н·м. Какой момент будет развивать электродвигатель

при той же угловой скорости, если к электродвигателю подвести 127 В (на фазу)?

2. Как по данным каталога на электродвигатели определить пусковой, критический и минимальный (при пуске) моменты асинхронного электродвигателя?

3. Какие характерные точки момента и скорости можно выделить на механической характеристике асинхронного электродвигателя?

4. Вам поручили переделать электропривод ленточного транспортера так, чтобы можно было уменьшить частоту вращения в 2 раза. Известно, что момент сопротивления транспортера не зависит от частоты вращения. Можно ли использовать для этой цели асинхронный короткозамкнутый электродвигатель с регулятором напряжения?

5. Асинхронные электродвигатели большой мощности (более 15 кВт) выпускаются со следующими паспортными данными соединения обмоток: 1 вариант – 220/380, Δ/Y ; 2 вариант – 380/660, Δ/Y . Какой вариант следует использовать для уменьшения пускового тока с переключением обмоток двигателя в сети 380 В? Во сколько раз уменьшится пусковой ток в линии?

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХСКОРОСТНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Общее время занятий – 2 часа

Мотивационная характеристика темы

Двухскоростные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором используются для ступенчатого регулирования частоты вращения рабочих машин. Знание их характеристик является непременным условием для надежной эксплуатации многоскоростных электродвигателей на производстве.

Цели занятия

1. Изучить основные схемы и маркировку обмоток многоскоростных электродвигателей.
2. Опытным путем определить механические, электромеханические и энергетические характеристики двухскоростного электродвигателя.

Задачи занятия

1. Познакомиться с оборудованием лабораторной установки.
2. Собрать принципиальную электрическую схему лабораторной установки.
3. Включить электродвигатель на первую (нижнюю) частоту вращения и опытным путем определить исходные данные для расчета характеристик электродвигателя.
4. Включить электродвигатель на вторую (высшую) частоту вращения и провести те же опыты, что в пункте 3.

Задание для самоподготовки

1. По учебнику [2, с. 156–160] изучить принцип изменения числа пар полюсов асинхронного двухскоростного электродвигателя и его характеристики.
2. Ответить в письменном виде на следующие вопросы:
 - приведите схему обмоток, поясняющих изменение числа полюсов в соотношении 2:1;

- нарисуйте механические характеристики двухскоростного электродвигателя, имеющего схему переключения $\Delta - Y$;
- какой диапазон регулирования скорости имеют многоскоростные электродвигатели?

Описание лабораторной установки

В лабораторной установке используются двухскоростной асинхронный электродвигатель 4А112МВ8/4У3, нагруженный генератором постоянного тока с независимым возбуждением, выполненным на базе электродвигателя П-31. Якорь генератора в свою очередь нагружен на три резистора $R1, R2, R3$ через переключатель $SA2$. Дистанционно измеряется частота вращения вала электродвигателя. Потребляемые асинхронным электродвигателем мощность, ток и напряжение измеряются с помощью цифрового измерительного прибора A .

Технические данные электродвигателя 4А112МВ8/4У3:

при числе полюсов 8: $P_n = 2,2$ кВт; $n_n = 710$ мин⁻¹; $I_1 = 6,5$ А; $\eta = 73$ %; $\cos\varphi_n = 0,69$; $\mu_n = 1,2$; $\mu_{\min} = 1,0$; $\mu_k = 1,8$; $S_n = 3,9$ %; $S_k = 25,5$ %; $i_n = 7,5$; $R_{1\phi} = 8,91$ Ом; $I_{\text{рот.дв.}} = 0,024$ кгм²;

при числе полюсов 4: $P_n = 3,6$ кВт; $n_n = 1430$ мин⁻¹; $I_1 = 8,1$ А; $\eta = 77$ %; $\cos\varphi_n = 0,88$; $\mu_n = 1,0$; $\mu_{\min} = 0,8$; $\mu_k = 1,8$; $S_n = 3,9$ %; $S_k = 32$ %; $i_n = 7,5$; $R_{1\phi} = 2,23$ Ом.

Технические данные ДПТ: тип ПЗ1; $P_n = 1,5$ кВт; $U_n = 110$ В; $I_n = 17,8$ А; $n_n = 1500$ мин⁻¹.

Таблица 3.1 – Перечень элементов схемы лабораторной установки

Позиционные обозначения	Наименование	Кол-во	Примечания
<i>QF1</i>	Автоматический выключатель АЕ2016	1	$I_{н.р.} = 10 \text{ А}$
<i>QF2</i>	Автоматический выключатель М611	1	$I_{н.р.} = 1,6 \text{ А}$
<i>M1</i>	Электродвигатель 4АМ112М8/4У3	1	$P_n = 3,6/2,2 \text{ кВт}$
<i>G</i>	Генератор ПЗ1	1	$P_n = 1,5 \text{ кВт}$
<i>KM1, KM2</i>	Контактор ПМЛ-110004В	2	$I_n = 10 \text{ А}$
<i>A</i>	Цифровой измеритель <i>UMG 96</i>	1	-
<i>BR</i>	Тахогенератор ТЭ-1	1	Цена деления 50 мин^{-1}
<i>PA</i>	Амперметр М42300	1	30 А
<i>PV</i>	Вольтметр М381	1	150 В

Методические указания

К задаче 3

Переключатель *SA1* поставить в положение 1, тем самым включить электродвигатель на низшую частоту вращения (при этом обмотки электродвигателя соединяются в треугольник, частота вращения магнитного поля – 750 мин^{-1}). Выполнить опыты для получения механических, электромеханических и энергетических характеристик электродвигателя. Для этого записать по форме таблицы 3.2 показания измерительных приборов при холостом ходе агрегата (*опыт 1*).

Измерять значения тока, активной мощности и $\cos\varphi$ по цифровому прибору *UMG 96*. В этом опыте возбуждение генератора не включать.

Для *опыта 2* включите возбуждение генератора (автоматический выключатель *QF2*). Включите *SA2* и установите *SA3* в положение 1. Тем самым якорь двигателя замкнется на резисторы *R1* и *R4*. Возникнет ток в цепи якоря и нагрузка на валу асинхронного электродвигателя. Записать по форме таблицы 3.2 показания измерительных приборов.

Для *опыта 3* установите *SA3* в положение 2 (включены резисторы *R2* и *R5*), а для *опыта 4* – *SA3* в положение 3 (включены резисторы *R3* и *R6*). Показания измерительных приборов записать по форме таблицы 3.2.

К задаче 4

Переключателем *SA1* подать питание на катушку *KM2*, тем самым включить электродвигатель на высшую частоту вращения (при этом обмотки электродвигателя соединены в параллельную звезду YY , частота вращения магнитного поля – 1500 мин^{-1}). Для создания большей нагрузки генератору зашунтировать перед этим резисторы *R4*, *R5* и *R6* перемычками. Выполнить опыты аналогично пункту 3. Результаты опытов записать по форме таблицы 3.2.

Расчетные формулы к таблице 3.2:

$$I_{1cp} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}; \quad (3.1)$$

$$P_1 = P_A + P_B + P_C; \quad (3.2)$$

$$\cos\varphi = \frac{\cos\varphi + \cos\varphi + \cos\varphi}{3}; \quad (3.3)$$

$$P_2 = U_{я} I_{я} + I_{я}^2 R_{я} + \Delta P_{xx}, \quad (3.4)$$

где $R_{я} = 0,5 \text{ Ом}$; ΔP_{xx} для опытов 1–4 принять 58 Вт; ΔP_{xx} , для опытов 5–8 принять 75 Вт.

$$M = \frac{P_2}{0,1045n}; \quad (3.5)$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (3.6)$$

Таблица 3.2 – Результаты опытов и расчетов

№ опыта, соединение обмоток	Измерено												Вычислено					
	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$P_A,$ Вт	$P_B,$ Вт	$P_C,$ Вт	$\cos\varphi_A,$ о.е	$\cos\varphi_B,$ о.е	$\cos\varphi_C,$ о.е	$I_{я},$ А	$U_{я},$ В	$n,$ мин ⁻¹	$I_{1cp},$ А	$P_1,$ Вт	$\cos\varphi_{cp},$ о.е.	$P_2,$ Вт	$M,$ Н·м	$\eta,$ о.е.
1, Δ (хх)																		
2, Δ																		
3, Δ																		
4, Δ																		
5, YY(хх)																		
6, YY																		
7, YY																		
8, YY																		

РЕПОЗИТОРИЙ БГАТУ

Содержание отчета

- Цель работы.
- Рисунок 3.1 и таблица 3.1. Данные электродвигателей.
- Таблица 3.2.
- По результатам таблицы 3.2. построить зависимость $\omega = f(M)$ для обоих выключений обмоток (Δ или YY) на одном графике; $\omega = f(I_{1cp})$ для обоих выключений обмоток (Δ или YY) – на втором графике; зависимости $\eta = f(P_2)$ и $\cos \varphi = f_2(P_2)$ – на третьем графике.
- Естественные механические характеристики $\omega = f(M)$ для обоих соединений обмоток (пар полюсов) на одном графике. Методика построения механической характеристики по 5 точкам рассмотрена в лабораторной работе № 2.
- Ответы на контрольные вопросы самоподготовки.

Контрольные вопросы

1. Как шифруется обозначение типоразмера многоскоростных электродвигателей?
2. Нарисуйте механические характеристики двухскоростного электродвигателя, имеющего схему подключения $Y-YY?$, $\Delta-YY?$
3. Имеется асинхронный электродвигатель с шестью выводами обмоток без их маркировки. Как и какими приборами можно определить, что это двигатель не односкоростной, а двухскоростной, с двумя независимыми обмотками?
4. На складе имеется асинхронный двигатель без паспортной таблички. Каким образом обнаружить при внешнем осмотре, что он двухскоростной? При попытке подключить его в сеть?
5. Вам поручили вместо односкоростного электродвигателя установить двухскоростной. Какие изменения надо будет сделать в механическом и электромеханическом монтаже?
6. Как обозначаются обмотки многоскоростных электродвигателей?

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Общее время занятия – 2 часа

Мотивационная характеристика темы

Двигатели постоянного тока (ДПТ) находят применение в металлорежущих станках, в мобильном транспорте (электрокары и т.п.), в стендовом оборудовании. Знание их характеристик позволяет правильно их эксплуатировать. Поэтому тема занятия актуальна для будущих инженеров-электриков.

Цели занятия

1. Опытным путем определить механические и электромеханические характеристики ДПТ с независимым возбуждением.
2. Опытным путем исследовать влияние напряжения, сопротивления в цепи якоря и тока возбуждения на механические и электромеханические характеристики ДПТ.

Задачи занятия

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Собрать принципиальную электрическую схему лабораторной установки.
3. Опытным путем определить механические и электромеханические характеристики ДПТ при двух разных напряжениях.
4. Опытным путем определить механические и электромеханические характеристики при включении сопротивления в цепь ротора ДПТ.
5. Опытным путем определить механические характеристики ДПТ при уменьшении тока в цепи возбуждения.
6. Расчетным путем построить естественную механическую характеристику испытуемого ДПТ.

Задание для самоподготовки

По учебнику [2, с. 48–57] изучить механические характеристики ДПТ. В письменном виде ответить на следующие вопросы:

- 1) запишите уравнения электромеханической и механической характеристик ДПТ независимого возбуждения;
- 2) какая угловая скорость называется «скорость идеального холостого хода»?
- 3) приведите определение понятия «Номинальное сопротивление двигателя».

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из ДПТ независимого возбуждения малой мощности типа ПЛ-062 ($P_n = 0,12$ кВт, $n_n = 2700$ мин⁻¹), вал которого соединен с валом аналогичного ДПТ, работающего генератором, якорь которого включен на резистор. ДПТ получает питание от автотрансформатора через выпрямитель. Это дает возможность питать ДПТ выпрямленным напряжением различной величины.

Паспортные данные электродвигателя ПЛ-062: $P_n = 0,12$ кВт; $U_n = 110$ В; $I_n = 1,9$ А; $n_n = 2700$ мин⁻¹; $\eta_n = 57$ %; $J_p = 0,0000325$ кг·м²; $R_{я} = 6,3$ Ом.

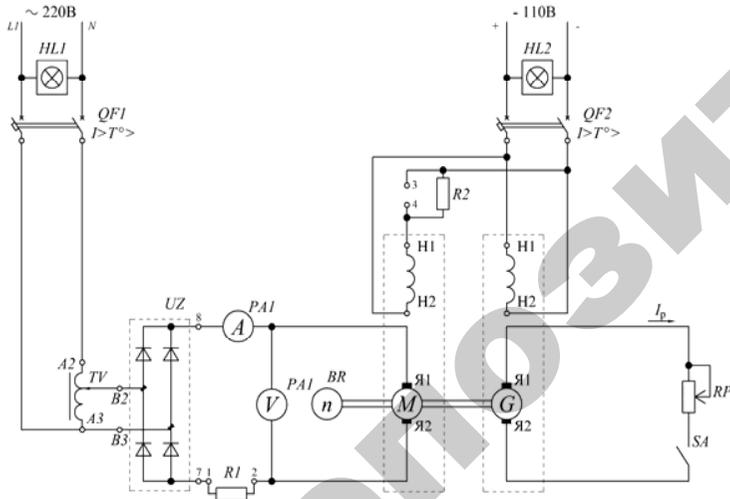


Рисунок 4.1. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

Таблица 4.1 – Перечень элементов лабораторной установки

Позиционные обозначения	Наименование	Кол-во	Примечания
<i>QF1, QF2</i>	Автоматический выключатель АЕ2016	2	$I_{н.р.} = 6$ А
<i>PV</i>	Автотрансформатор РНО-250-5	1	$I_n = 20$ А
<i>Uz</i>	Выпрямитель собственного изготовления	1	—
<i>PA</i>	Амперметр М381	1	2 А
<i>PV</i>	Вольтметр М330	1	150 В
<i>M, G</i>	Эл. машина ПЛ-62	2	$P_n = 0,12$ кВт
<i>BR</i>	Тахометр ТМ-4	1	1 дел=16,6 мин ⁻¹
<i>RP1</i>	Лабораторный реостат РПМ-1	1	1 А, 200 Ом

Методические указания

К задаче 3

Замкнуть перемычками (проводниками) клеммы 1–2 и 3–4, а выключатель *SA* разомкнуть. Установить автотрансформатор *TV* в положение наименьшего выходного напряжения. Для этого рукоятку регулирующего механизма установить в крайнее левое положение. Включить *QF2*, а потом *QF1*.

Установить на якоре двигателя напряжение, при котором частота вращения двигателя достигнет наибольшего значения (2000 мин⁻¹). Записать при этой частоте вращения показания приборов (**1 опыт**, холостой ход генератора). Далее, замкнуть цепь якоря генератора выключателем *SA*, загружать генератор до тока 2 А, уменьшая сопротивление реостата *RP1* (**второй, третий и четвертый опыты**). Данные записать по форме таблицы 4.2.

Повторить четыре опыта (**пятый, шестой, седьмой и восьмой**) при другом напряжении на якоре, при котором в опыте холостого хода (**пятый опыт**) частота вращения составит 1000 мин⁻¹. Данные опытов записать по форме таблицы 4.2.

К задаче 4

Разомкнуть перемычку 1–2, тем самым в цепь якоря двигателя будет включен резистор *RI*. Обмотка возбуждения остается включенной на полное напряжение.

Разомкнуть SA . Включить $QF2$, а потом $QF1$ (при нулевом напряжении на выходе автотрансформатора).

Установить на якоре напряжение, соответствующее холостому ходу в опыте 1. Увеличивать нагрузку генератора, уменьшая RPI . Прodelать 4 опыта (девятый, десятый, одиннадцатый и двенадцатый). Результаты опытов записать по форме таблицы 4.2.

К задаче 5

Замкнуть переключку 1–2 и разомкнуть переключку 3–4. Тем самым в обмотку возбуждения двигателя включается резистор $R2$ и ток этой обмотки уменьшается.

Разомкнуть SA . Включить $QF2$ и $QF1$. С помощью автотрансформатора **установить на якоре напряжение, соответствующее опыту 5.** Не меняя положение рукоятки автотрансформатора, включить SA . Нагружать генератор. Прodelать 4 опыта (13–16). Результаты опытов записать по форме таблицы 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты опытов и расчетов

Номер опыта	U_d , В	I_d , А	$n_{дв}$, мин ⁻¹	ω , рад/с
1			2000	
2				
3				
4				
5			1000	
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				

К задаче 6

Естественная механическая характеристика ДПТ $\omega = f(M)$ строится по двум точкам:

1) $M = 0$ при

$$\omega = \omega_0 = \frac{U_n}{k\Phi};$$

$$k\Phi = \frac{U_n - I_n R_{я}}{\omega_n}; \quad (4.2)$$

2) $M = M_n$ при $\omega = \omega_n$,

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}. \quad (4.3)$$

Угловая скорость вала электродвигателя:

$$\omega_n = 0,1045n_n. \quad (4.4)$$

Содержание отчета

- Цель работы.
- Принципиальная электрическая схема лабораторной установки и таблица 4.1.
- Ответы в (письменном виде) на вопросы самоподготовки.
- Таблица 4.2.
- Графические зависимости $\omega = f_1(M)$ на одном графике для всех опытов таблицы 4.2 и для естественной механической характеристики, определенной по пункту 6.
- То же, $\omega = f(I_{дв})$.
- Выводы о влиянии $U_{я}$, $R_{доб}$ и тока возбуждения $I_{в}$ на механические и электромеханические характеристики ДПТ.

Контрольные вопросы

1. Как изменяется скорость идеального холостого хода при уменьшении тока возбуждения?
2. Как зависит скорость ДПТ от напряжения на якоре?
3. Как зависит скорость ДПТ от сопротивления в цепи якоря?
4. Расскажите, как строится естественная механическая характеристика ДПТ с независимым возбуждением?
5. К чему приводит обрыв цепи возбуждения ДПТ?

6. Определите величину добавочного резистора для уменьшения пускового тока ДПТ в данной работе до значения $2,5I_{ном}$.

7. Можно ли утверждать, что уменьшение тока возбуждения в 2 раза вызывает увеличение скорости ДПТ в два раза?

8. Можно ли утверждать, что уменьшение напряжения на якоре ДПТ в 2 раза приводит к уменьшению скорости вращения ДПТ в два раза?

9. Можно ли утверждать, что увеличение добавочного сопротивления в 2 раза по сравнению с сопротивлением якоря приводит к падению скорости в два раза большему, чем падение скорости на естественной характеристике?

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ С АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

Общее время занятий – 3 часа

Мотивационная характеристика темы

Асинхронные электродвигатели (АД) с короткозамкнутым (КЗ) ротором являются самыми распространенными в сельскохозяйственном производстве. Каждый запуск или торможение электродвигателя сопровождается переходным процессом. Знание характера протекающих переходных процессов при пуске и торможении позволит будущим инженерам правильно эксплуатировать электроприводы.

Цели занятия

1. Опытным путем исследовать электромеханические процессы при прямом пуске АД и при основных электрических торможениях.
2. Освоить методику опытного определения приведенного момента инерции асинхронного электропривода рабочей машины (опыт свободного выбега).
3. Исследовать энергетику переходных процессов.

Задачи занятия

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Снять кривую самоторможения рабочей машины.
3. Провести опыт пуска электродвигателя.
4. Провести опыт торможения АД противовключением.
5. Провести опыт динамического торможения АД.

Задание для самоподготовки

По учебнику [2, с. 83–88; с. 291–298] изучить тормозные режимы АД и переходные процессы в электроприводе с АД. Ответить в письменном виде на следующие вопросы.

- 1) Какие существуют методы электрического торможения электродвигателей? Какие их преимущества и недостатки?
- 2) Какой вид имеют механические характеристики АД с КЗ ротором при торможении противовключением?

3) Какой вид имеют механические характеристики АД с КЗ ротором при динамическом торможении?

Описание лабораторной установки

В лабораторной установке используется заточный станок типа ТАД – 1 для стригальных машин, имеющий АД с КЗ ротором и двумя валам, на которых установлены заточные чугунные диски (один диск снят). Технические данные АД: $P_n = 0,4$ кВт; $U_n = 380$ В; $I_n = 1,15$ А; $n_n = 1420$ мин⁻¹; $\eta_n = 68$ %; $\cos\varphi = 0,75$.

Данные каталога: $\mu_{кр} = 2,2$; $\mu_n = 2$; $J_{рот} = 0,142 \cdot 10^{-2}$ кг·м². Данные дисков: диаметр – 0,35 м; толщина диска – 0,1 м; плотность материала – 7500 кг/м³.

Управляется электродвигатель вручную с помощью переключателя SA, имеющего три положения. В первом положении электродвигатель запускается; во втором – обмотка АД подключается к сети постоянного тока для динамического торможения; в третьем – электродвигатель реверсируется (торможение противовключением).

Методические указания

К задаче 2

Кривая самоторможения электропривода показывает изменение скорости вала электродвигателя в процессе выбега, после отключения от сети.

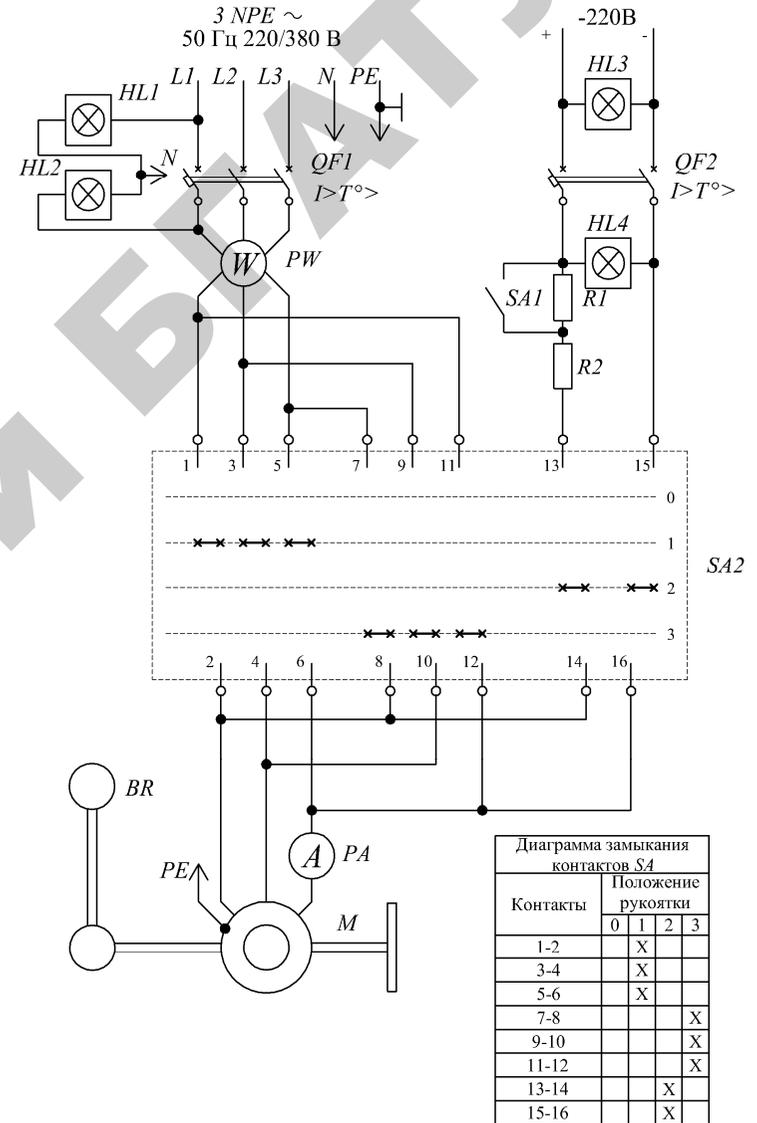


Рисунок 5.1. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки для исследования переходных процессов пуска и торможения асинхронного электродвигателя

Таблица 5.1 – Перечень элементов схемы рисунка 5.1

Поз. обозн.	Наименование	Кол-во	Примечания
QF1	Автоматический выключатель (иностраный)	1	2,5 А
QF2	Автоматический выключатель АП502МТ	1	$I_{н.р.} = 10\text{А}$
SA2	Универсальный переключатель УП5000	1	$I_{н.р.} = 10\text{А}$
PA	Амперметр М330	1	5 А
M	Электродвигатель ТНГ-4	1	$P_{н.р.} = 0,4\text{ кВт}$
BR	Цифровой тахометр ТЭ-Д	1	-
PW	Ваттметр Д571, 5 А, 380 В	1	3 кВт

Кривая самоторможения нужна для определения приведенного момента инерции электропривода по методу свободного выбега (см. приложение 5).

Сначала электропривод разгоняется, установив переключатель SA2 в положение 1. Частоту вращения следует определять по цифровому тахометру. После разбега она составляет $\sim 1496\text{ мин}^{-1}$. Переводят SA2 в положение 0 и включают секундомер. Замеряют частоту вращения через каждые 10 с (5 измерений), а также полное время остановки электродвигателя. Результаты опыта записать по форме таблицы 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты опыта самоторможения

Частота вращения n , мин^{-1}	1496						0
Время, с	0	10	20	30	40	50	
Угловая скорость ω , рад/с	156,3						

К задаче 3

При запуске электродвигателя измерять пусковой ток и время пуска. Цифровой тахометр изменяет свои показания каждые 2 с, поэтому вносит большую погрешность в измерения. Наиболее точно можно оценить время пуска по поведению стрелки ваттметра. При включении электродвигателя стрелка ваттметра отклониться резко вправо, а в конце разбега вернется до установившегося значения. Этот промежуток времени надо измерять с помощью секундомера.

При пуске АД стрелка амперметра резко уходит вправо по инерции, и отсчеты тока получаются неточными. Для точного замера пускового тока рекомендуется проделать пуск, а затем включить

АД на реверс. В момент, когда скорость двигателя станет равной нулю, засечь показания амперметра. Контролировать нулевую скорость двигателя можно по вращению диска, закрепленного на валу двигателя.

Опыт проводить два раза. В таблицу 5.3 записать среднее значение тока и времени пуска.

К задаче 4

Опыт торможения противовключением проделать также два раза и записать в таблицу 5.3 среднее значение.

К задаче 5

Опыт динамического торможения проделать для двух значений постоянного тока. В первом случае (при меньшем токе) тумблер SA1 отключить, а во втором случае (при большем токе) тумблер SA1 включить. Ток измерять при неподвижном электродвигателе. Опыты повторять в двукратной последовательности. Записать в таблицу 5.3 среднее значение тока и времени.

Таблица 5.3 – Результаты опытов и расчетов

Переходной процесс	Измерено			Вычислено	
	I , А	Δt , с	Δn , мин^{-1}	$\Delta\omega$, рад/с	$M_{\text{эф}}$, Н·м
Пуск					
Торможение противовключением					
Динамическое торможение SA1 разомкнут					
SA1 замкнут					
Δn – изменение частоты вращения за время пуска и торможения, мин^{-1}					

В таблице 5.3 эффективный момент вычислить из основного уравнения электропривода:

$$M_d - M_c = J_{\text{пр}} \frac{d\omega}{dt}, \quad (5.1)$$

приняв: $M_d = M_{\text{эф}}$; $M_c = 0,11\text{ Н·м}$ (эти данные определены специальным опытом); $J_{\text{пр}}$ определить расчетом:

$$J_{\text{пр}} = J_{\text{рот}} + J_{\text{диск}}, \quad (5.2)$$

где $J_{\text{рот}}$ – момент инерции ротора (из каталожных данных), $\text{кг}\cdot\text{м}^2$.

$$J_{\text{диск}} = \frac{mR^2}{2}, \quad (5.3)$$

где R – радиус диска, м; $R = 0,175$ м;
 m – масса диска, кг.

$$m = \pi R^2 \delta p, \quad (5.4)$$

где δ – толщина диска, м ($\delta = 0,01$ м);
 p – плотность материала диска, $\text{кг}/\text{м}^3$ ($p = 7500$ $\text{кг}\cdot\text{м}^2$).

При пуске:

$$M_{\text{эф.пуск}} = J_{\text{пр}} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} + 0,11, \quad (5.5)$$

где $\Delta\omega = 0,1045 \cdot \Delta n$.

При торможении противовключением и динамическом торможением:

$$M_{\text{эф.т.пр}} = J_{\text{пр}} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} - 0,11. \quad (5.6)$$

Содержание отчета

- Цель работы.
- Принципиальная электрическая схема лабораторной установки и таблица 5.1.
- Ответы в письменном виде на вопросы самоподготовки.
- Таблицы 5.2 и 5.3.
- Кривая свободного выбега электропривода, графические построения и расчеты для определения $J_{\text{пр}}$ по формуле П 5.3 приложения 5.
 - Расчеты $M_{\text{эф}}$ для таблицы 5.3.
 - Выводы о точности определения $J_{\text{пр}}$ и о недостатках и преимуществах различных способов торможения.

Контрольные вопросы

1. Что такое момент инерции и какова его размерность?
2. Как определить момент инерции по кривой выбега (самоторможения)?
3. От чего зависит время пуска электропривода?
4. От чего зависит время самоторможения и время электрического торможения электропривода?
5. Вам предложили разработать схему для обеспечения быстрой остановки машины, имеющей большой момент инерции. Привод нереверсивный осуществляется асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором и недоступным валом. Какой способ вы выберете: противовключением или динамическим торможением?
6. Вам поручили провести опыт для того, чтобы уточнить механическую характеристику дробилки при разгоне вхолостую. Самоторможение ее происходит в течение нескольких десятков секунд. Приведенный момент инерции известен. Как можно выполнить это поручение?

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Общее время занятий – 2 часа

Мотивационная характеристика темы

В практике инженеров электриков встречается необходимость принудительно затормозить электропривод для быстрой его остановки. Для этой цели может быть использовано динамическое торможение электродвигателя, изучаемое в данной работе. Поэтому тема лабораторного занятия актуальна для будущих инженеров-электриков.

Цели занятия

1. Исследовать характеристики АД при динамическом торможении.
2. Научиться определять параметры тока возбуждения для динамического торможения.

Задачи занятия

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Собрать принципиальную электрическую схему лабораторной установки.
3. Провести опыт самоторможения электропривода.
4. Провести опыт динамического торможения электропривода при различных токах возбуждения.

Задание для самоподготовки

По учебнику [2, с. 84–88, 297] изучить динамическое торможение асинхронных электродвигателей. Ответить в письменном виде на следующие вопросы:

- 1) какими могут быть схемы включения обмоток статора АД с короткозамкнутым ротором при динамическом торможении?
- 2) объясните понятие «эквивалентный ток» возбуждения АД при динамическом торможении;
- 3) в каком состоянии (насыщения или ненасыщения) находится магнитная система электродвигателя при неподвижном состоя-

нии ротора и возбуждении обмоток эквивалентным постоянным током?

Описание лабораторной установки

В лабораторной установке используется трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, на валу которого установлен стальной диск для увеличения общего момента инерции электропривода. На одном конце вала электродвигателя закреплен тахогенератор постоянного тока, а на другом – реле контроля скорости.

Ток возбуждения регулируется лабораторным реостатом, включенным в сеть постоянного тока. Время полного торможения измеряется электрическим секундомером, ток возбуждения – амперметром. Контролируется частота вращения в процессе торможения с помощью реле контроля скорости SR .

Технические данные электроустановки:

тип двигателя 4А80А6У3; $P_n = 0,75$ кВт; $n_o = 1000$ мин⁻¹; $\eta_n = 69$ %; $\cos\varphi = 0,74$; $U_n = 380$ В; Y ; $m_{\min} = 1,6$; $m_n = 2,0$; $\mu_k = 2,2$; $S_n = 8,4$ %; $S_k = 37$ %; $K_i = 4,0$; $I_{p.d} = 0,0031$ кг·м²; $2R_{1\phi} = 21,6$ Ом; $I_{\max} = 0,01$ кг·м².

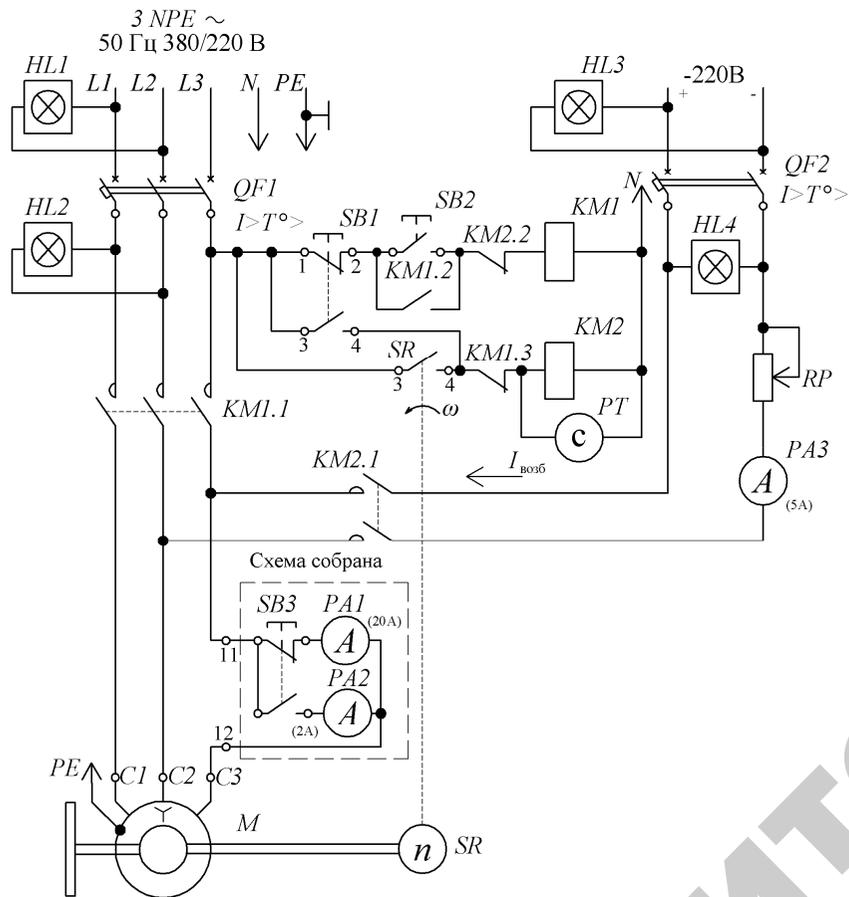


Рисунок 6.1. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

Таблица 6.1 – Перечень элементов схемы

Поз. обозн.	Наименование	Кол-во	Примечания
<i>QF1</i>	Автоматический выключатель MSM600/16	1	$I_{н.р} = 16 \text{ A}$
<i>QF2</i>	Автоматический выключатель ВА51-25-340010РУХЛЗ	1	$I_{н.р} = 6 \text{ A}$
<i>M</i>	Электродвигатель 4А80А6УЗ	1	$P_n = 0,75 \text{ кВт}$
<i>PA1</i>	Амперметр Э365-1	1	2 А
<i>PA2</i>	Амперметр Э365-1	1	20 А
<i>KM1, KM2</i>	Пускатель (контактор) ПМЛ-110004В	2	
<i>PA3</i>	Амперметр М381	1	5 А
<i>SR</i>	Реле контроля скорости РКС	1	
<i>PR</i>	Переменный резистор РСР	1	50 Ом, 2 А
<i>PT</i>	Секундомер ПВ-53Ш	1	—

Методические указания

К задаче 3

Включить *QF1*. Включить *KM1* путем нажатия на кнопку *SB2* «Пуск». Измерить значение тока холостого хода I_{xx} . Измерение произвести, нажав на кнопку *SB3*. При этом амперметр *PA1* (на 20 А) отключится и включится амперметр на 2 А (*PA2*).

После этого отключить автоматический выключатель *QF1* и замерить время самоторможения электропривода с помощью секундомера. Данные опыта записать по форме таблицы 6.2.

К задаче 4

Включить *QF1* и *QF2*. Установить *RP* в такое положение, чтобы ток $I_{возб} = 1,5 \text{ A}$. Для этого нажать на кнопку *SB1* «Стоп» и удерживать ее во включенном положении. Включится электромагнитный пускатель *KM2*. Его контакты *KM2.1* подключат постоянный ток к обмоткам двигателя. С помощью резистора *RP* установить $I_{возб} = 1,5 \text{ A}$. После чего кнопку *SB1* отпустить. Таким образом можно настроить $I_{возб}$ на другое значение тока.

Включить двигатель, нажав на кнопку *SB2*. При этом включится электромагнитный пускатель *KM1*. Его силовые контакты *KM1.1* подключат двигатель в сеть. Первый блок-контакт *KM1.2* зашунтирует кнопку *SB2* «Пуск», и теперь кнопку *SB2* можно отпустить.

Второй блок-контакт *KM1.3* разорвет цепь катушки *KM2*. При разбеге двигателя контакт *SR* замкнется.

Провести опыт динамического торможения. Для этого кратковременно нажать на кнопку *SBI* «Стоп». Электромагнитный контактор *KM1* и электродвигатель отключатся. Блок-контакт *KM1.3* включится и замкнет цепь катушки *KM2*, отчего электромагнитный пускатель *KM2* включится и его контакты *KM2.1* подключат постоянный ток к обмоткам двигателя. Одновременно включится секундомер *PT*. Будет происходить динамическое торможение двигателя до тех пор, пока скорость не снизится до малых значений, при которых контакт *SR* разомкнется и отключится электромагнитный пускатель *KM2*. Торможение прекратится. Секундомер остановится.

Замерить ток и время торможения. Данные записать по форме таблицы 6.2.

Таблица 6.2 – Результаты опытов и расчетов

Номер опыта	Измерено				Вычислено		
	I_{XX} , А	$t_{св.выб.}$, с	$I_{возб.}$, А	$t_{торм.}$, с	$\Delta\omega$, рад/с	$M_{эф.}$, Н·м	Примечание (вычисляется момент)
1			—	—			Холостого хода
2	—	—	1,5				Торможения при токе 1,5 А
3	—	—	2,0				То же при токе 2 А
4	—	—	3,0				При 3 А
5	—	—	4,0				При 4 А

Повторить опыты при положении резистора *RP*, обеспечивающего токи 2,0; 3,0; 4,0 А. Последний опыт соответствует минимальному сопротивлению резистора *RP*.

Эффективный момент вычисляется по формуле:

$$M_{эф.} = J_{пр} \frac{\Delta\omega}{t_{торм}}, \quad (6.1)$$

где $J_{пр} = J_{р.д.} + J_{мах.}$;

$$\Delta\omega = \omega_n - 0;$$

$$\omega_n = \omega_0(1 - S_n), \text{ рад/с}; \quad (6.2)$$

$$\omega_0 = 0,1045n_0, \text{ рад/с}; \quad (6.3)$$

где n_0 – по данным двигателя, мин⁻¹.

Содержание отчета

- Цель работы.
- Принципиальная электрическая схема лабораторной установки и таблица 6.1.
- Ответы в письменном виде на вопросы самоподготовки.
- Таблица 6.2.
- Зависимость $t_{торм} = f(I_{возб.})$;
- Построить механическую характеристику $n = f(M)$ испытуемого АД расчетом во втором квадранте, пользуясь универсальными механическими характеристиками динамического торможения АД, приведенными на рисунке 6.2.

Выполнить расчеты для $I_{возб} = 3I_0$.

$$\text{Принять } M_n = \frac{P_n}{\omega_n}; \quad (6.4)$$

$$n_c = 1000 \text{ мин}^{-1}.$$

- Выводы о влиянии тока возбуждения на время торможения и вывод о виде механической характеристики АД при динамическом торможении.

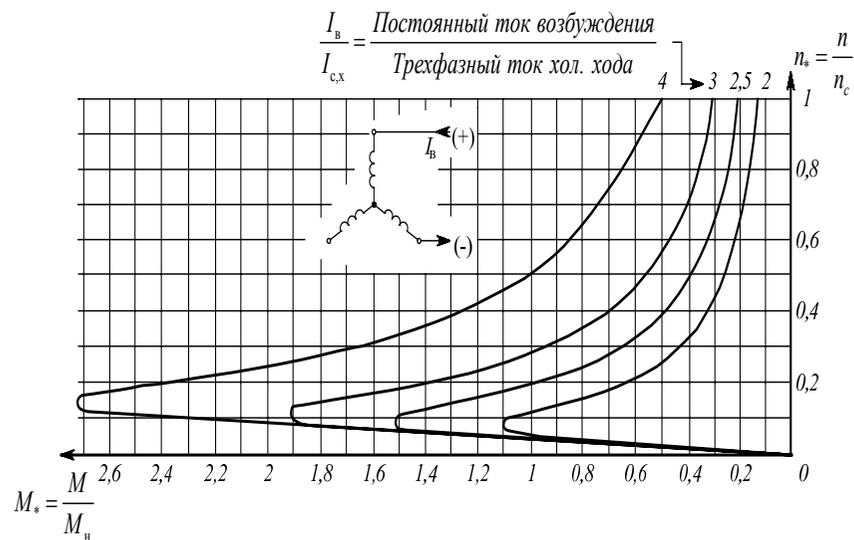


Рисунок 6.2. Универсальные механические характеристики динамического торможения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (номинальное скольжение двигателя $s_{\text{н}} = 0,08$)

Расчетные формулы:

$$n = n^* \cdot n_{\text{с}}; \quad (6.5)$$

$$M = M^* \cdot M_{\text{н}}. \quad (6.6)$$

Например, для $n^* = 0,7$ находим по рисунку 6.2 $M^* = 0,4$, следовательно, по (6.5) и (6.6) определяем:

$$n = 0,7 \cdot 1000 = 700 \text{ мин}^{-1},$$

$$M = 0,4M_{\text{н}}.$$

Задаваясь различными значениями относительной частоты вращения n^* , определяем M^* и далее выполняем расчет по (6.5) и (6.6). Данные расчета записать по форме таблицы 6.3.

Таблица 6.3 – Расчет механической характеристики динамического торможения по универсальным характеристикам динамического торможения АД

	Относительная частота вращения n^*											
	0	0,05	0,1	0,12	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	1	
Относительный момент, M^*												
Действительный момент двигателя по (6.6)												
Действительная частота вращения n по (6.5)												

Контрольные вопросы

1. Объясните вид механической характеристики АД при динамической торможении.
2. Какие частоты тока индуцируются в роторе в начальный момент торможения и в конце торможения, при малой скорости?
3. Запишите основные уравнения электропривода при динамическом торможении.
4. Какие упрощения приняты при нахождении динамического момента по формуле $M_{\text{д}} = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$ при динамическом торможении?
5. Расскажите методику построения механической характеристики АД при динамическом торможении по универсальным характеристикам АД.
6. Как можно повысить точность нахождения зависимости $n = f(t)$, полученной в опытах лабораторной работы?

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ РАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ

Общее время занятий – 2 часа

Мотивационная характеристика темы

Напряжение в реальных электрических сетях не остается постоянной величиной. Это сказывается на энергетических характеристиках асинхронного электродвигателя. Знание этих характеристик является непременным условием правильной эксплуатации электродвигателей. По этой причине тема занятия актуальна для будущей работы инженера-электрика.

Цели занятия

1. Изучить влияние напряжения на потери, КПД и $\cos\phi$ асинхронного электродвигателя.
2. Освоить методику энергетических испытаний асинхронного электродвигателя.

Задачи занятия

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Собрать принципиальную электрическую схему лабораторной установки.
3. Провести испытание асинхронного электродвигателя при напряжении питания 120 В.
4. Провести испытание асинхронного электродвигателя при напряжении питания 180 В.
5. Провести испытание асинхронного электродвигателя при наибольшем напряжении питания (примерно 220 В).

Задание для самоподготовки

По учебнику [2, с. 351–355, с. 357–358] изучить влияние величины напряжения на характеристики АД. Ответить в письменном виде на следующие вопросы:

- 1) перечислите основные потери в асинхронном электродвигателе;
- 2) запишите выражение для определения КПД электродвигателя;

3) запишите выражение для определения коэффициента мощности электродвигателя.

Описание лабораторной установки

В лабораторной установке используется трехфазный регулятор напряжения типа ТС–6, асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором и электромагнитным тормозом, создающий нагрузку на валу электродвигателя.

Измерение потребляемых токов, а также мощности и напряжения, производится цифровым измерительным прибором UMG96. Момент на валу электродвигателя измеряется по шкале электромагнитного тормоза, а частота вращения – по шкале тахометра.

Технические данные электродвигателя: тип двигателя А41-6; $P_n = 1$ кВт; $U_n = 220/380$ В; Δ/Y ; $n_n = 930$ мин⁻¹; $\eta_n = 77$ %; $\cos\phi = 0,72$; $K_i = 5,5$; $\mu_n = 1,8$; $\mu_k = 2,2$; $I_{p.d.} = 0,17$ кг·м²; $I_{max} = 0,128$ кг·м².

Таблица 7.1 – Перечень элементов схемы

Поз. обозн.	Наименование	Кол-во	Примечания
<i>QF1</i>	Автоматический выключатель АД-14, тип С	1	$I_n = 25$ А
<i>QF2</i>	Автоматический выключатель АЕ 2025	1	$I_n = 5$ А
<i>QF3</i>	Автоматический выключатель ВА47-29, тип С	1	$I_n = 10$ А
<i>TV</i>	Трехфазный автотрансформатор ТС – 6	1	$S_n = 6$ кВт
<i>M</i>	Электродвигатель А41-4	1	$P_n = 1$ кВт
<i>PV</i>	Вольтметр Э365-1	1	500 В
<i>A</i>	Цифровой измеритель UMG-96	1	—
<i>УВ</i>	Электромагнитный тормоз ЭТ-1	1	—
<i>BR</i>	Тахометр ТМЗ-П	1	50 мин ⁻¹ /дел.
<i>RP</i>	Переменный резистор РПШ-1	1	200 Ом, 1 А

Таблица 7.2 – Результаты опытов и расчетов

Измерено													Вычислено									
$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$	$I_{1A}, А$	$I_{1B}, А$	$I_{1C}, А$	$P_{1A}, Вт$	$P_{1B}, Вт$	$P_{1C}, Вт$	$S_{1A}, ВА$	$S_{1B}, ВА$	$S_{1C}, ВА$	$n_2, мин^{-1}$	$M, Н \cdot м$	$I_{1cp}, А$	$P_1, Вт$	$\omega_2, рад/с$	$P_2, Вт$	$\Delta P, Вт$	$\eta, \%$	$\cos\phi, о.е.$	$P_2, о.е.$	
												xx										
												900										
												850										
												800										
												xx										
												900										
												850										
												800										
												xx										
												900										
												850										
												800										

РЕПОЗИТОРИЙ БГУИР

Расчетные формулы к таблице 7.2.
Средний ток:

$$I_{1cp} = \frac{I_{1A} + I_{1B} + I_{1C}}{3}. \quad (7.1)$$

Среднее напряжение:

$$U_{cp} = (U_A + U_B + U_C) \frac{1}{3}. \quad (7.2)$$

Потребляемая активная мощность:

$$P_1 = P_{1A} + P_{1B} + P_{1C}. \quad (7.3)$$

Потребляемая полная мощность:

$$S_1 = S_A + S_B + S_C. \quad (7.4)$$

Частота вращения вала:

$$\omega_2 = 0,1045n_2. \quad (7.5)$$

Мощность на валу:

$$P_2 = M \cdot \omega_2. \quad (7.6)$$

Потери мощности:

$$\Delta P = P_1 - P_2. \quad (7.7)$$

КПД двигателя:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (7.8)$$

Коэффициент мощности двигателя:

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{S_1}. \quad (7.9)$$

Относительная мощность, о.е.:

$$P_2^* = \frac{P_2}{P_n}, \quad (7.10)$$

где P_n – номинальная мощность электродвигателя, кВт.

Содержание отчета

- Цель работы.
- Принципиальная электрическая схема лабораторной установки и таблица 7.1.
- Ответы в письменном виде на вопросы самоподготовки.
- Таблица 7.2.
- Графические зависимости, показывающие влияние нагрузки и напряжения на основные энергетические показатели электродвигателя:
 $\eta = f(P_2)$ при различных напряжения в одних осях координат;
 $\cos\varphi = f(P_2)$ при различных напряжения в одних осях координат;
 $\Delta P = f(P_2)$ при различных напряжениях в одних осях координат;
- Вывод о влиянии нагрузки и уровня напряжения на η и $\cos\varphi$.

Контрольные вопросы

1. Как вычислить КПД электродвигателя, если известна мощность на валу P_2 и потери мощности ΔP ?
2. Какие величины необходимо знать, чтобы определить мощность электродвигателя расчетом?
3. Как вычислить потери мощности электродвигателя, если известна мощность на валу P_2 и КПД электродвигателя?
4. По каким формулам вычисляются потери в обмотках статора и ротора электродвигателя?
5. С помощью каких измерительных приборов измеряется коэффициент мощности?

Лабораторная работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Общее время занятий – 2 часа

Мотивационная характеристика темы

Мощность электродвигателя и его работоспособность ограничиваются нагревом обмоток. Поэтому для практической работы важно знать:

- 1) законы изменения температуры при нагреве;
- 2) от чего зависит нагрев электродвигателя;
- 3) как влияет режим работы на нагрев электродвигателя.

Ответы на эти вопросы рассматриваются в данной лабораторной работе.

Цели занятия

1. Экспериментально установить характер протекания процессов нагрева и охлаждения электродвигателя.
2. Изучить методы определения постоянной времени нагрева и охлаждения электродвигателя.

Задачи занятия

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Собрать принципиальную электрическую схему лабораторной установки.
3. Провести опыт нагрева электродвигателя в режиме *S1*.
4. Провести опыт нагрева электродвигателя в режиме *S3*.
5. Провести опыт охлаждения электродвигателя.

Задание для самоподготовки

По учебнику [2, с. 348–358] изучить нагрев и охлаждение электродвигателя в различных режимах работы. Ответить в письменном виде на следующие вопросы:

- 1) какие классы изоляции по теплостойкости используются в электродвигателе и какая их допустимая предельная температура нагрева?
- 2) какое значение температуры окружающей среды принимается номинальным?

- 3) что такое «температура превышения»? Как она вычисляется?

Описание лабораторной установки

В лабораторной установке исследуется нагревание и охлаждение асинхронного электродвигателя. Для измерения температуры обмотки используется термопара типа ХА (хром – алюмель), заложённая в обмотку. Концы ее присоединены к цифровому термометру *A*.

Асинхронный электродвигатель нагружен генератором постоянного тока *G2*, работающим на нагрузочные резисторы *R1–R6*. Возбуждение генератора независимое.

Для выбора режима работы электродвигателя используется переключатель *SA5*. При установке его в положение 1 двигатель включается в режим работы *S1*, а при установке в положение 2 – в режим работы *S3*. Переключение электродвигателя в режиме *S3* осуществляется реле времени *KT*.

Технические данные электродвигателя 4А112МВ8/4У3:
при числе полюсов 8: $P_n = 2,2$ кВт; $n_n = 710$ мин⁻¹; $I_1 = 6,5$ А;
 $\eta = 73$ %; $\cos\varphi_n = 0,69$; $\mu_n = 1,2$; $\mu_{\min} = 1,0$; $\mu_k = 1,8$; $S_n = 3,9$ %;
 $S_k = 25,5$ %; $i_n = 7,5$; $R_{1\phi} = 8,91$ Ом; $I_{\text{рот.дв.}} = 0,024$ кгм²;

при числе полюсов 4: $P_n = 3,6$ кВт; $n_n = 1430$ мин⁻¹; $I_1 = 8,1$ А;
 $\eta = 77$ %; $\cos\varphi_n = 0,88$; $\mu_n = 1,0$; $\mu_{\min} = 0,8$; $\mu_k = 1,8$; $S_n = 3,9$ %;
 $S_k = 32$ %; $i_n = 7,5$; $R_{1\phi} = 2,23$ Ом.

Технические данные ДПТ: тип ПЗ1; $P_n = 1,5$ кВт; $U_n = 110$ В;
 $I_n = 17,8$ А; $n_n = 1500$ мин⁻¹.

Таблица 5.1 – Перечень элементов схемы

Поз. обозн.	Наименование	Кол-во	Примечания
<i>QF1</i>	Автоматический выключатель АЕ2016	1	$I_{н.р} = 10 \text{ А}$
<i>QF2</i>	Автоматический выключатель м611	1	$I_{н.р} = 1,6 \text{ А}$
<i>M1</i>	Электродвигатель 4АМ112М8/4У3	1	$P_n = 3,6/2,2 \text{ кВт}$
<i>G</i>	Генератор ПЗ1	1	$P_n = 1,5 \text{ кВт}$
<i>KM1, KM2</i>	Электромагнитный пускатель (контактор) ПМЛ-110004В	2	$I_n = 10 \text{ А}$
<i>A2</i>	Цифровой термометр ИР «Сосна-003»	1	—
<i>BR</i>	Тахогенератор ТЭ-1	1	$50 \text{ мин}^{-1}/\text{дел}$
<i>PA</i>	Амперметр М42300	1	30 А
<i>PV</i>	Вольтметр М381	1	150 В
<i>A1</i>	Цифровой измеритель UMG-96	1	—

Методические указания

К задаче 2

Цепи терморпары, термометра и тахометра собирать не надо.

К задаче 3

Установить *SA1* в положение 0, *SA4* – в положение 1 (вверх по схеме). Создать нагрузку в цепи генератора, т.е. включить *KM2* переключателем *SA2* и замкнуть цепи переключателя *SA3* в положение 1, или 2, или 3 (по заданию преподавателя). Включить возбуждение генератора (включить *QF2*).

Для снятия кривой нагрева и охлаждения электродвигателя пользуются показаниями термометра *A* и ручными часами (см. таблицу 8.2). Включить термометр *A* выключателем *SA5*. Включить электродвигатель (*SA1* в положение 1). Записывать показания термометра через время, указанное в таблице 8.2. Записать температуру окружающей среды (термометр закреплен на лабораторном стенде). Через 30 минут отключить электродвигатель.

К задаче 4

Снять кривую нагрева электродвигателя в режиме *S3*. Для этого переключить *SA4* в положение 2 (**вниз по схеме**). Двигатель будет периодически включаться и отключаться с помощью реле времени

КТ. Данные опыта записать по форме таблицы 8.3. Опыт проводить в течение 15 минут.

К задаче 5

Отключить электродвигатель и снять кривую охлаждения электродвигателя (до конца занятия). Данные опыта записать по форме таблицы 8.4.

Таблица 8.2 – Данные опыта нагрева электродвигателя в режиме *S1*

Время (от начала отсчета), мин	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	13	15	20	25	30
Температура обмотки, °С																
Температура окружающего воздуха, °С	В начале опыта _____ В конце опыта _____															

Таблица 8.3 – Данные опыта нагрева электродвигателя в режиме *S3*

Время (от начала отсчета), мин	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	13	15
Температура обмотки, °С													
Температура окружающего воздуха, °С	В начале опыта _____ В конце опыта _____												

Таблица 8.4 – Данные опыта охлаждения электродвигателя

Время (от начала отсчета), мин	0	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30	35	40
Температура обмотки, °С													
Температура окружающего воздуха, °С	В начале опыта _____ В конце опыта _____												

Содержание отчета

- Цель работы.
- Принципиальная электрическая схема лабораторной установки и таблица 8.1.
- Ответы в письменном виде на вопросы самоподготовки.
- Таблицы 8.2–8.4.
- Графические зависимости по данным таблицы 8.2 $\tau = f_1(t)$, где температура превышения $\tau = \theta_{\text{обм}} - \theta_{\text{окр.ср}}$, °C; t – время, мин.
- Пользуясь графиком $\tau = f_1(t)$, найти установившуюся температуру нагрева $\tau_{\text{уст}}$ (см. приложение 8).
- Найти постоянную времени нагрева электродвигателя по методу касательной:
 - а) при $t = 0$;
 - б) в точке $\tau = 0,632\tau_{\text{уст}}$.
- Найти постоянную времени нагрева электродвигателя по методу трех температур (см. приложение 8).

Вычислить среднее арифметическое значение постоянной времени нагрева T_n .
- Построить график $\tau = f_2(t)$ по данным таблицы 8.3.
- Построить график $\tau = f_3(t)$ по данным таблицы 8.4. Пользуясь графиком, найти постоянную времени охлаждения электродвигателя по методу касательной и по методу двух точек (см. приложение 8). Определить среднее значение постоянной времени охлаждения T_o .
- Вычислить коэффициент ухудшения теплоотдачи электродвигателя:

$$\beta_0 = \frac{T_n}{T_o}. \quad (8.1)$$

- Определить расчетом T_n :

$$T_n = \frac{C}{A} = \frac{420 \cdot m}{\Delta P_n / \tau_n}, \quad (8.2)$$

где m – масса электродвигателя, кг; $m = 72$ кг;

A – теплоотдача электродвигателя, Дж/м²;

ΔP_n – номинальные потери, Вт;

τ_n – допустимая температура превышения, °C ($\tau_n = 65$ °C);

420 – удельная теплоемкость электродвигателя, Дж/(кг·°C).

- Номинальные потери:

$$\Delta P = P_n \left(\frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \right), \quad (8.3)$$

где P_n – номинальная мощность, Вт; принять $P_n = 2200$ Вт;

η_n – номинальный КПД; $\eta_n = 73$ %.

Контрольные вопросы

1. Какие классы изоляции применяются в современных электрических машинах? Какие их допустимые температуры?
2. Каким способом можно определить температуру обмоток электрических машин?
3. Напишите уравнение теплового баланса электродвигателя.
4. Каким уравнением описывается процесс нагрева электродвигателя?
5. Какой физический смысл имеет постоянная времени нагрева?
6. Назовите методы определения постоянной времени нагрева.
7. Как определить время нагрева электродвигателя до установившегося значения превышения температуры?
8. Почему для самовентилирующихся электродвигателей постоянная времени охлаждения больше постоянной времени нагрева?
9. Что называется коэффициентом ухудшения теплоотдачи?
10. Определите номинальную мощность электродвигателя, если известно, что в процессе нагрева, при известной мощности на валу 10 кВт, он нагрелся до температуры превышения 55 °C.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Коварский, Е.М.* Испытание электрических машин / Е.М. Коварский, Ю.И. Янко. – Москва: Энергоатомиздат. – 320 с.
2. *Чиликин, М.Г.* Общий курс электропривода : учебник для вузов/ М.Г. Чиликин, А.С. Сандер – 6 изд. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
3. *Фоменков, А.П.* Электропривод сельскохозяйственных машин, агрегатов и поточных линий : учебник для высш. с.–х. учебн. Заведений / А.П. Фоменков – 2-е изд. – Москва: Колос, 1984. – 288 с.
4. Асинхронные двигатели серии 4А : справочник / А.Э. Кравчик [и др.]. – Москва: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
5. *Фираго, Б.И.* Теория электропривода: учебное пособие / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – 2-е изд. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1 (справочное)

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Вентиляторы широко применяются для вентиляции помещений, в калориферах, зерносушилках, пневмотранспортерах. Для проектирования и правильной эксплуатации электроприводов вентиляторов необходимо знать их аэродинамические, механические и энергетические характеристики.

• При переменной частоте вращения рабочего колеса вентилятора аэродинамические параметры изменяются следующим образом:

подача – пропорциональна угловой скорости:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}; \quad (\text{П 1.1})$$

давление – пропорционально квадрату угловой скорости:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2. \quad (\text{П 1.2})$$

При постоянной частоте вращения рабочего колеса подача и давление зависят от аэродинамической характеристики сети (воздуховодов). Рабочая точка вентилятора на аэродинамической характеристике соответствует точке пересечения аэродинамических характеристик вентилятора и сети (рисунок П 1.1).

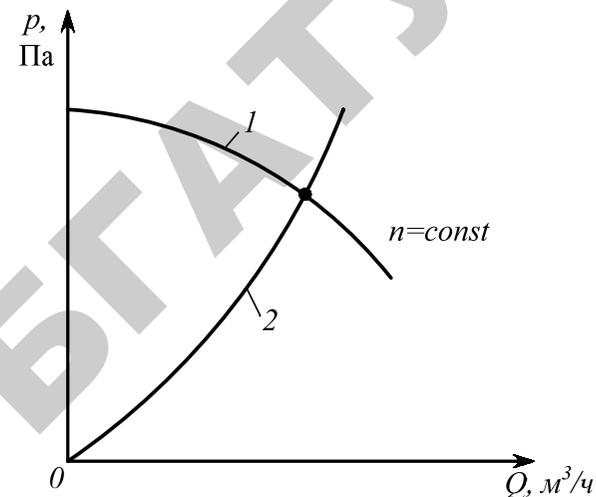


Рисунок П 1.1. Аэродинамическая характеристика вентилятора (1) и сети (2)

• Механическая характеристика вентилятора, как и других рабочих машин, есть зависимость статического сопротивления на валу от угловой скорости этого вала. В общем виде она выражается формулой:

$$M_c = M_{co} + (M_{сн} - M_{co}) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2, \quad (\text{П 1.3})$$

где M_{co} – начальная момента трения (сопротивления) в подшипниках и передачах, Н·м.

$$M_{co} \approx (0,05 - 0,3) M_{сн}, \quad (\text{П 1.4})$$

где $M_{сн}$ – момент на валу вентилятора при номинальной частоте вращения, Н·м;

ω , ω_n – текущая и номинальная угловые скорости рабочего колеса, рад/с.

Следует отметить, что механическая характеристика $M_c = \omega^2$ настолько типична для многих рабочих машин, что она имеет свое название – **вентиляторная механическая характеристика**.

С точки зрения электропривода важно знать не только механическую характеристику, но и зависимость мощности на валу венти-

лятора от подачи воздуха при $\omega = \text{const}$, а также мощности на валу от частоты вращения при постоянных параметрах воздухопроводной сети.

Мощность $P_{\text{в}}$ на валу вентилятора – это мощность воздушного потока плюс мощность потерь в вентиляторе.

$$P_{\text{в}} = \frac{pQ}{\eta_{\text{в}}}, \quad (\text{П 1.5})$$

где Q – подача, $\text{м}^3/\text{с}$;

p – давление, Па;

$\eta_{\text{в}}$ – КПД вентилятора.

Из формулы видно, что мощность на валу при изменении подачи и постоянной частоте вращения зависит от характера изменения давления и подачи, т.е. вида аэродинамической характеристики вентилятора.

- **Центробежные вентиляторы** имеют пологие аэродинамические характеристики и требуют значительного увеличения мощности при увеличении подачи (в 2 – 2,5 раза при переходе от режима полностью закрытого выходного отверстия до режима полностью открытого выходного отверстия вентилятора). По этой причине для электродвигателей центробежных вентиляторов наиболее опасным является режим работы при прорыве воздуховода, когда подача воздуха увеличивается до максимальных значений. На практике, учитывая возможный разброс характеристик вентиляторов и, в связи с этим, возможность изменения режимов работы, мощность электродвигателей выбирают с учетом коэффициента запаса: при $P_{\text{в}}$ до 0,75 кВт – $K_3 = 2$; при $P_{\text{в}}$ от 0,75 до 1,5 кВт – $K_3 = 1,25$; при $P_{\text{в}}$ от 4 до 7 кВт – $K_3 = 1,2$; при $P_{\text{в}}$ выше 7,5 кВт – $K_3 = 1,1$.

Мощность электродвигателя привода вентилятора для продолжительного режима работы:

$$P_2 = P_{\text{в}} K_3 = \frac{pQ}{\eta_{\text{в}} \eta_{\text{п}}} K_3, \quad (\text{П 1.6})$$

где $\eta_{\text{п}}$ – КПД передачи, о.е.;

K_3 – коэффициент запаса, о.е.

- **Осевые вентиляторы** имеют крутопадающие аэродинамические характеристики и, как правило, не требуют повышения мощности при увеличении подачи. Возможное изменение мощности составляет не более 10 %, поэтому коэффициент запаса для них $K_3 \leq 1,1$.

Мощность (Вт) определяется выражением:

$$P = M \cdot \omega, \quad (\text{П 1.7})$$

где ω – угловая скорость, рад/с.

Поскольку при изменении скорости $M_c \equiv \omega^2$, то для случая изменения скорости рабочего колеса **мощность вентилятора изменяется пропорционально кубу угловой скорости:**

$$P \equiv \omega^2 \omega \equiv \omega^3. \quad (\text{П 1.8})$$

Эту особенность вентиляторов нужно помнить и учитывать в практической работе.

Приложение 2 (справочное)

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

В условиях эксплуатации возможны случаи, когда напряжение на зажимах статора асинхронного электродвигателя отличается от номинального. Например, при колебаниях напряжения во время пуска крупных короткозамкнутых электродвигателей, при переключениях схем обмоток статора и в других случаях. Асинхронные электродвигатели весьма чувствительны к изменениям напряжения, так как от него зависит магнитный поток в машине.

На практике искусственные характеристики при изменении напряжения используют для осуществления пуска электродвигателя с уменьшенными пусковыми токами и моментами, а также при регулировании частоты вращения малых по мощности электродвигателей. В последнем случае применяют специальные электродвигатели, имеющие большое критическое скольжение, приближающееся к единице, и различные регуляторы напряжения.

Поскольку вращающий момент электродвигателя пропорционален магнитному потоку, зависящему от напряжения на зажимах, и активной составляющей тока ротора, которая в свою очередь пропорциональна напряжению, то электромагнитный вращающий момент оказывается пропорционален квадрату напряжения, в то время как ток прямо пропорционален напряжению. Ток и момент, кроме того, сложно зависят от частоты вращения (скольжения) асинхронного электродвигателя.

На вид механической характеристики влияют как внешние параметры, так и внутренние параметры электродвигателя. При неизменной частоте тока питающей сети **наибольшее влияние на вид механической характеристики асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором оказывает величина питающего напряжения.**

Момент, развиваемый асинхронным электродвигателем, пропорционален квадрату напряжения, т.е.

$$M \equiv kU_1^2, \quad (\text{П } 2.1.)$$

где k – коэффициент, зависящий от параметров электродвигателя и от скольжения.

Критическое скольжение $S_{кр}$ асинхронного электродвигателя не зависит от напряжения сети, а ток для каждого значения скольжения прямо пропорционален напряжению сети, т.е.

$$I_1 \equiv k_1 U_1, \quad (\text{П } 2.2.)$$

где k_1 – коэффициент, зависящий от параметров электродвигателя и от скольжения.

Вид механических характеристик асинхронного электродвигателя при разных напряжениях изображен на рисунке П 2.1.

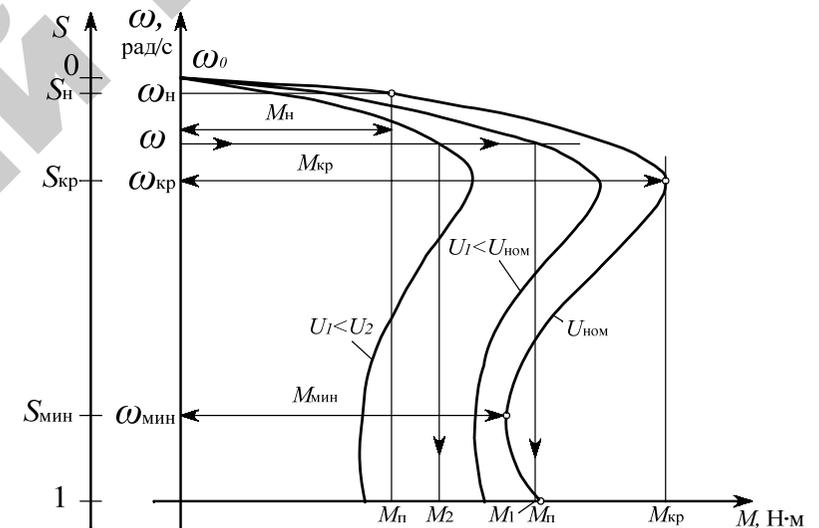


Рисунок П 2.1. Механические характеристики асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором при различном напряжении питающей сети

Приложение 3 (справочное)

О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ДВУХСКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В единых сериях асинхронных электродвигателей изготавливаются двух, трех, четырехскоростные трехфазные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Они отличаются от обычных тем, что на статоре имеются несколько самостоятельных обмоток, или несколько обмоток состоящих из двух частей (полуобмоток). В обоих случаях получают разные угловые скорости магнитного поля в машине, следовательно, и разные номинальные угловые скорости, за счет чего обеспечивается ступенчатое регулирование скорости рабочих органов.

Если полуобмотки соединяются последовательно, получается больше полюсов и меньшая угловая скорость. Когда полуобмотки соединяют параллельно, причем направление тока в одной из них изменяется на противоположное, число полюсов уменьшается в два раза, а угловая скорость магнитного поля, соответственно, увеличивается в два раза. Трех и четырехскоростные двигатели имеют две отдельные обмотки, одна или две из которых состоят из двух частей.

В трехфазных электродвигателях для переключения числа пар полюсов реализуют две схемы переключения обмоток:

- а) с треугольника, в котором полуобмотки соединены последовательно, на двойную звезду, в которой полуобмотки соединены параллельно: $\Delta/Y\bar{Y}$;
- б) с последовательной звезды на двойную звезду: $Y/Y\bar{Y}$.

При любом переключении номинальная мощность при меньшей скорости получается меньше. Но *в первом случае переключения $\Delta/Y\bar{Y}$ различие в мощности небольшое, а в моменте различие примерно в 2 раза* (рисунок П 3.1, а).

Во втором случае переключения $Y/Y\bar{Y}$ номинальные моменты одинаковые, а мощность на высшей скорости в два раза больше, потому что частота вращения на высшей скорости в 2 раза больше.

Следовательно, двигатель с переключением обмоток $\Delta/Y\bar{Y}$ целесообразно применять при регулировании, когда необходима неизменная

(постоянная) мощность при регулировании (рисунок П 3.1, б), а с переключением $Y/Y\bar{Y}$ – при постоянном моменте (рисунок П 3.1, а).

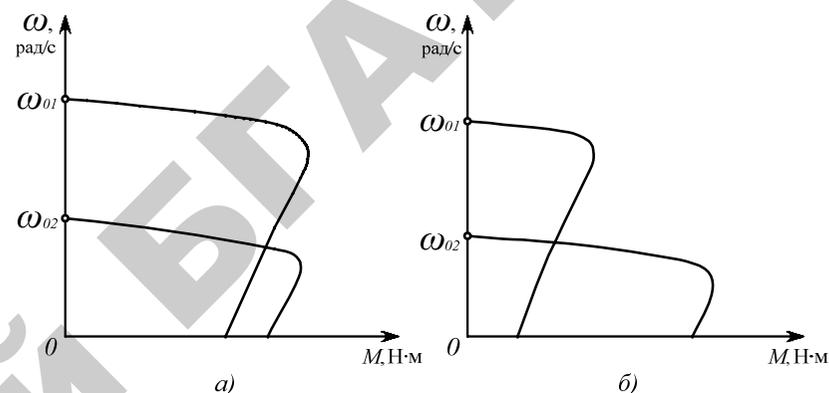


Рисунок П 3.1. Механические характеристики:
а) – для схем $Y/Y\bar{Y}$; б) – для схем $\Delta/Y\bar{Y}$

Начала трех фаз обмоток односкоростных асинхронных электродвигателей обозначают $C1, C2, C3$. Обмотка, с началом $C1$ имеет конец $C4$. Если начало обмотки $C2$, то конец обмотки $C5$, если начало $C3$, то конец – $C6$.

Многоскоростные обмотки имеют перед буквами $C1-C3$ цифры означающие число полюсов: если $2C1, 2C2, 2C3$ – двухполюсная обмотка; если $4C1, 4C2, 4C3$ – четырехполюсная обмотка; если $6C1, 6C2, 6C3$ – то шестиполюсная и т.д. Концы обмоток многоскоростных электродвигателей не выводятся в клеммную коробку, а соединяются в треугольник или звезду внутри обмотки. В клеммную коробку выводятся только начала обмоток.

В многоскоростных электродвигателях, в зависимости от соотношения чисел полюсов и мощностей, используются статорные обмотки с переключением полюсов: 1) по схемам Даландера; 2) по схемам Харитоновой; 3) с тремя нулевыми точками; 4) по принципу амплитудно-фазовой модуляции. Схемы таких обмоток изображены в справочнике [4].

**МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА
НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ**

Естественная и искусственные механические характеристики ДПТ параллельного или независимого возбуждения изображены на рисунке 4.1.

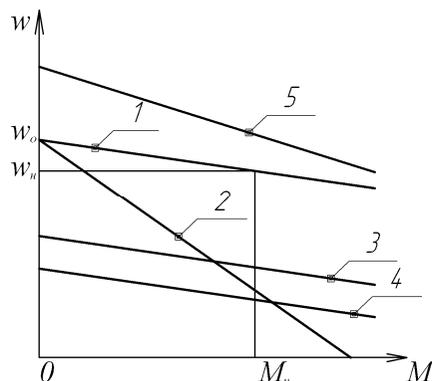


Рисунок П 4.1. Естественная (1), и искусственные (2–5) механические характеристики ДПТ параллельного или независимого возбуждения:
2 – при включении $R_{доб}$ в цепь якоря; 3, 4 – при различных напряжениях на якоре; 5 – при уменьшенном токе возбуждения

Из рисунка П 4.1 следует, что *при уменьшении напряжения наклон механических характеристик ДПТ не изменяется, а скорость идеального холостого хода ω_0 уменьшается пропорционально напряжению.*

При включении $R_{доб}$ в цепь якоря наклон характеристик увеличивается, а $\omega_0 = \text{const}$.

Уменьшение возбуждения приводит к увеличению скорости ДПТ и к увеличению наклона механической характеристики.

Поскольку между током и моментом у ДПТ параллельного или независимого возбуждения существует прямо-пропорциональная зависимость, то электромеханические характеристики $\omega = f(I)$ по виду соответствуют механическим характеристикам ДПТ $\omega = f(M)$.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ РАБОЧЕЙ
МАШИНЫ МЕТОДОМ СВОБОДНОГО ВЫБЕГА**

Сущность метода свободного выбега или самоторможения заключается в следующем. Если отключить приводной двигатель от сети, то вращающиеся части (ротор и т.п.) будут продолжать вращаться за счет кинетической энергии, постепенно замедляясь в результате действия тормозящих сил, обусловленных потерями вращения.

Известно, что кинетическая энергия вращающихся частей системы:

$$W_k = J \frac{\omega^2}{2}, \quad (\text{П } 5.1)$$

где J – момент инерции системы, кг/м²;

ω – угловая скорость, рад/с; $\omega = 0,1045n$;

n – частота вращения, мин⁻¹.

Очевидно, что кинетическая энергия, запасенная приводом, при самоторможении будет расходоваться на преодоление потерь вращения за период торможения.

Определение приведенного момента инерции системы производится при помощи касательной, проведенной в начальной точке А к кривой $\omega = f(t)$ до пересечения ее с осью абсцисс (рисунок П 5.1).

Так как основное уравнение движения электропривода имеет вид:

$$M_d = M_c + J_{np} \frac{d\omega}{dt}, \quad (\text{П } 5.2)$$

то в случае самоторможения, когда $M_d = 0$, момент сопротивления M_c является общим моментом сопротивления механизма и момента потерь вращения привода. Тогда момент инерции:

$$J_{np} = \frac{M_c}{\frac{d\omega}{dt}}, \quad (\text{П } 5.3)$$

где $\frac{d\omega}{dt} = \operatorname{tg}\alpha = \frac{AO}{OB}$.

Значение момента сопротивления M_c можно определить из выражения:

$$M_c = \frac{\Delta P_{\text{мех}}}{\omega}, \quad (\text{П } 5.4)$$

где $\Delta P_{\text{мех}}$ – механические потери вращения привода, соответствующие скорости ω , Вт.

Механические потери вращения $\Delta P_{\text{мех}}$ находятся из потерь холостого хода ΔP_o , которые в свою очередь состоят из потерь в стали статора $\Delta P_{\text{ст}}$, механических потерь вращения $\Delta P_{\text{мех}}$, и потерь в меди статора ΔP_m и добавочных потерь $\Delta P_{\text{доб}} \approx 0,005 \cdot \Delta P_o$.

$$\Delta P_o = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_m + \Delta P_{\text{доб}}. \quad (\text{П } 5.5)$$

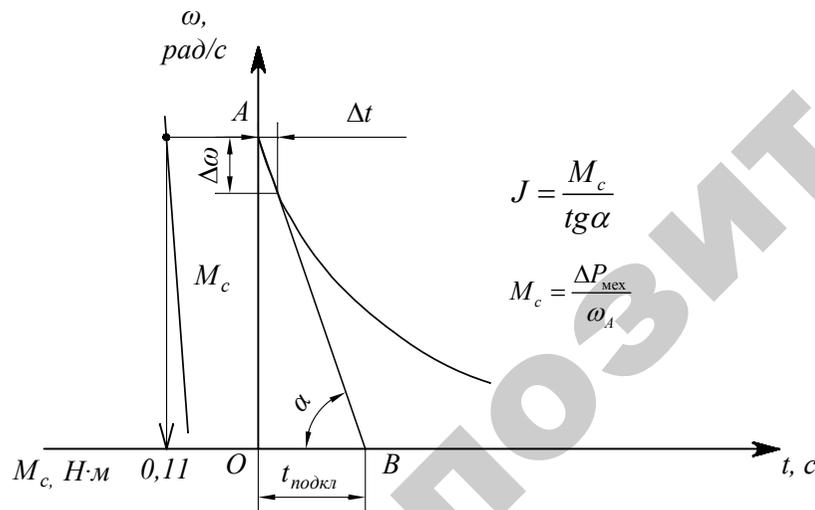


Рисунок П 5.1. Определение момента инерции по кривой свободного выбега

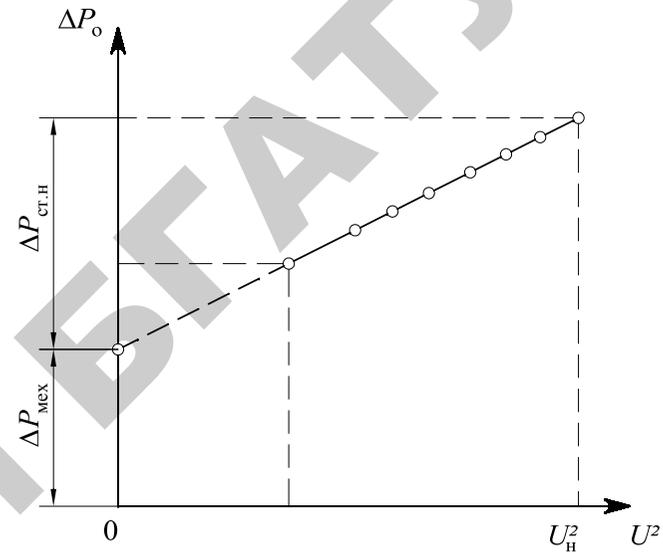


Рисунок П 5.2. Определение механических потерь вращения асинхронного привода

Потери в меди определяются по формуле:

$$\Delta P_m = 3I_1^2 r_1, \quad (\text{П } 5.6)$$

где I_1 – фазный ток обмотки статора, А;

r_1 – сопротивление обмотки одной фазы статора, Ом.

Суммарные потери в стали статора и механические потери вращения находятся следующим образом:

$$\Delta P_{\text{ст.мех}} = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех}} = \Delta P_o - \Delta P_m - \Delta P_{\text{доб}}. \quad (\text{П } 5.7)$$

Для того чтобы найти $\Delta P_{\text{мех}}$, необходимо отделить от $\Delta P_{\text{ст.мех}}$ потери в стали статора $\Delta P_{\text{ст}}$. Это достигается построением зависимости $\Delta P_o = f(U^2)$ (рисунок П 5.2). Предварительно снимается опытным путем зависимость $\Delta P_o = f(U)$. Для этого с помощью регулятора напряжения изменяют напряжение U_1 на двигателе и записывают значения I_1 и ΔP_o . По формулам (П 5.6) и (П 5.7) вы-

ДИНАМИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

числяют $\Delta P_{\text{ст.мех}} = f(U_1^2)$. Для получения более точного результата снимают около 10 точек при уменьшении напряжения до 100 В. Затем, экстраполируя экспериментальную кривую до оси ординат (т.е. до значения $U^2 = 0$), получают значение $\Delta P_{\text{мех}}$, так как потери в стали статора $\Delta P_{\text{ст}}$ при $U = 0$ равны нулю, и, следовательно, остаются одни механические потери вращения.

Для лабораторной работы № 5 M_c определен опытным путем (из опыта холостого хода методом разделения потерь) и составляет $M_c = 0,11$ Н·м.

Для осуществления динамического торможения обмотка статора машины отключается от сети и подключается к источнику постоянного тока. Основные схемы включения обмотки статора приведены ниже, в таблице П 6.1.

Постоянный ток, протекая по обмотке статора, создает постоянное поле с синусоидальным распределением индукции.

В таблице П 6.1 приведены векторные диаграммы пространственного сложения намагничивающих сил фаз статора. При этом предположено, что число последовательно соединенных витков в фазе составляет ω_1 .

В целях упрощения анализа работы машины целесообразно несимметричную систему возбуждения машины постоянным током заменить эквивалентной, с точки зрения амплитуды намагничивающей силы, симметричной системой трехфазного тока.

Амплитуда намагничивающей силы трехфазной обмотки, обтекаемой трехфазным током, определяется выражением:

$$F_{\text{пер}} = \frac{3}{2} I_{\text{м}} \omega_1, \quad (\text{П } 6.1)$$

где $I_{\text{м}}$ – амплитуда фазного тока.

Приравняв $F_{\text{пер}}$ амплитуде намагничивающей силы постоянного тока $F_{\text{п}}$, можно получить следующее значение амплитуды трехфазного переменного тока $I_{\text{м.эquiv}}$, эквивалентного по величине намагничивающей силы обмотки постоянному току, а именно:

$$F_{\text{п}} = F_{\text{пер}} = \frac{3 I_{\text{м.эquiv}} \omega_1}{2}, \quad \text{П } 6.2$$

откуда

$$I_{\text{м.эquiv}} = \frac{2 F_{\text{п}}}{3 \omega_1}. \quad (\text{П } 6.3)$$

Действующее значение этого тока $I_{\text{экв}}$, которое в дальнейшем будет называться эквивалентным током, как известно, получается путем деления амплитудного значения на $\sqrt{2}$. Отсюда:

$$I_{\text{экв}} = \frac{\sqrt{2}F_{\text{п}}}{3\omega_1}. \quad (\text{П } 6.4)$$

На основании этой зависимости подсчитаны данные в последней строке таблицы П 6.1, связывающие значения постоянного и эквивалентного переменного тока для каждой из схем.

При вращении ротора в нем индуцируется э.д.с., частота которой определяется следующим образом:

$$f_2 = \frac{pn}{60}, \quad (\text{П } 6.5)$$

где n – скорость вращения ротора, мин^{-1} ;

p – число пар полюсов обмотки.

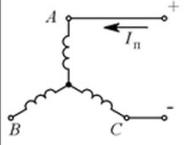
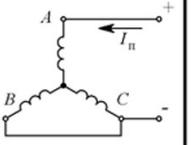
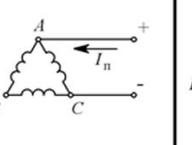
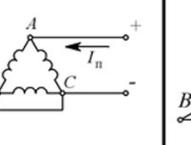
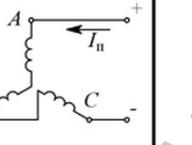
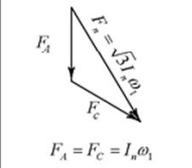
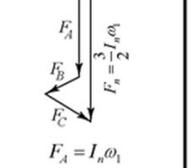
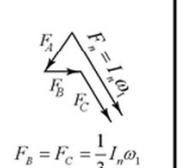
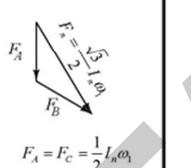
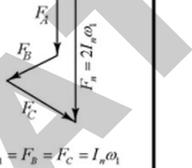
Скорость поля при нормальном питании электродвигателя трехфазным током (или так называемая синхронная скорость):

$$n_c = \frac{60f_1}{p}, \quad (\text{П } 6.6)$$

то

$$f_2 = f_1 \frac{n}{n_c}. \quad (\text{П } 6.7)$$

Таблица П 6.1 – Расчетные соотношения для разных схем соединения обмоток АД в режиме динамического торможения

Вариант	1	2	3	4	5
Схема соединения обмоток					
Векторная диаграмма МДС	 $F_A = F_C = I_n \omega_1$	 $F_A = I_n \omega_1$ $F_B = F_C = \frac{1}{2} I_n \omega_1$	 $F_B = F_C = \frac{1}{3} I_n \omega_1$ $F_A = \frac{2}{3} I_n \omega_1$	 $F_A = F_C = \frac{1}{2} I_n \omega_1$	 $F_A = F_B = F_C = I_n \omega_1$
$I'_{\text{ЭКВ}}$	$2r$	$\frac{3}{2} r_1$	$\frac{2}{3} r_1$	$\frac{r_1}{2}$	$3r_1$
R_n	$\sqrt{\frac{2}{3}} I_n$	$\frac{1}{\sqrt{2}} I_n$	$\frac{\sqrt{2}}{3} I_n$	$\frac{1}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}} I_n$	$\frac{2\sqrt{2}}{3} I_n$

Величина скорости вращения ротора, вследствие неподвижности поля, представляет одновременно ту скорость, с которой линии силы магнитного поля пересекаются проводниками ротора.

Отношение этой величины к синхронной скорости представляет собой характерную для асинхронных машин величину **скольжения при торможении**, т.е.

$$\frac{n}{n_c} = S. \quad (\text{П } 6.8)$$

Отсюда для частоты тока ротора получается такое же выражение, как и для случая нормальной схемы питания машины трехфазным током:

$$f_2 = f_1 S. \quad (\text{П } 6.9)$$

В результате взаимодействия поля статора с током ротора образуется тормозящий момент.

Поле ротора вращается относительно ротора в противоположенном по отношению к его движению направлении со скоростью:

$$n_2 = n_1 S, \quad (\text{П } 6.10)$$

т.е. со скоростью, равной скорости самого ротора.

Таким образом, это поле будет неподвижным по отношению к статору.

Примерная механическая характеристика асинхронной машины в режиме динамического торможения имеет вид кривой 1 рисунка П 6.2. В том случае, когда машина ненасыщена и можно полагать, что при всех значениях скольжения реактивное сопротивление намагничивания $x_p = x_{\mu 0}$, для механической характеристики получается уравнение:

$$M = \frac{2M_m}{\frac{S}{S_m} + \frac{S_m}{S}}. \quad (\text{П } 6.11)$$

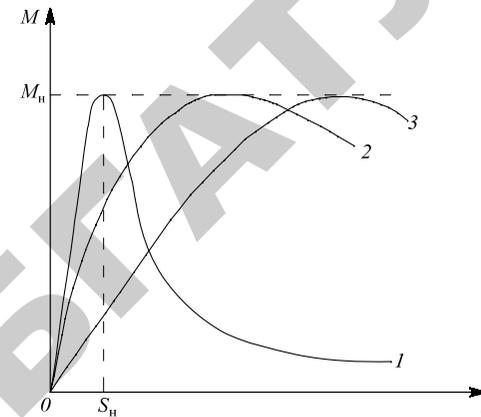


Рисунок П 6.2. Механические характеристики асинхронной машины при динамическом торможении для различных значений вторичного сопротивления

Здесь M_m и S_m максимальный момент и соответствующие скольжение, выражающиеся следующим образом:

$$M_m = \frac{1,46 I_{\text{эКВ}}^2 x_{\mu 0}^2}{n_c (x_{\mu 0} + x_2')}, \quad (\text{П } 6.12)$$

где n_c — синхронная скорость вращения, мин^{-1} .

$$S_m = \frac{r_2'}{x_{\mu 0} + x_2'}. \quad (\text{П } 6.13)$$

Механическая характеристика асинхронной машины в режиме динамического торможения имеет такое же аналитическое выражение, как и характеристика для нормальной схемы включения машины. Однако они значительно отличаются друг от друга величиной идентичных параметров S_m и S_k . При одинаковых значениях r_2' и x_2' значение S_m будет значительно меньше, чем S_k .

Например, для короткозамкнутого двигателя при величине эквивалентного тока, близкой к номинальному первичному току, $S_m = 0,02 \div 0,06$, тогда как $S_k = 0,14 \div 0,2$.

Максимальный момент M_m в зависимости от величины постоянного тока может быть большим или меньшим критического момента в нормальной схеме.

Изменение механической характеристики динамического торможения практически осуществляется за счет либо вторичного сопротивления, либо величины намагничивающего тока I_H и вызывающего пропорциональное изменение $I_{\text{экв}}$.

Значения I_H , x_H , I_2' и M сохраняются, если при увеличении вторичного сопротивления в той же пропорции увеличивается скольжение. Это значит, что **скольжение S_m будет меняться пропорционально изменению вторичного сопротивления, а максимальный момент останется неизменным.**

Последнее видно также из выражений (П 6.12) и (П 6.13), относящихся к случаю ненасыщенной магнитной цепи.

Таким образом, *изменение вторичного сопротивления на характеристику динамического торможения оказывает такое же влияние, как и на характеристику нормальной схемы включения.*

Влияние вторичного сопротивления на механическую характеристику динамического торможения иллюстрируется на рисунке П 6.2.

На нем показаны три характеристики одной и той же машины, имеющей одинаковый намагничивающий ток, и три различных значения вторичного сопротивления. Характеристика 1 отвечает меньшему значению сопротивления, а характеристика 3 – большему значению этого сопротивления.

Кривая 2 представляет характеристику для промежуточного значения сопротивления.

При изменении величины постоянного тока в статоре, а, значит, и пропорциональном изменении эквивалентного тока $I_{\text{экв}}$ момент в случае ненасыщенной цепи машины ($x_H = x_{H0} = \text{const}$) меняется в квадратичной зависимости от тока, увеличиваясь с его увеличением. При насыщенной цепи те же изменения тока вызывают меньшее изменение момента.

Так как в реальных условиях машина при работе в режиме динамического торможения с малыми скольжениями насыщена, а при больших – не насыщена, то изменение постоянного тока влечет за собой сильные изменения момента в области больших скольжений и относительно небольшие изменения в области малых скольжений. Механические характеристики АД при динамическом торможении и различных токах возбуждения имеют вид рисунка 6.2 (см. лабораторное занятие № 6).

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Существенным вопросом в работе асинхронного электродвигателя является анализ потерь энергии при превращении электрической энергии в механическую. В асинхронном двигателе энергия передается через магнитное поле воздушного зазора из статора на ротор. Преобразование энергии из одного вида в другой неизбежно связано с потерями в различных частях машины.

Различают потери в обмотках (меди) статора ΔP_{m1} и ротора ΔP_{m2} в стали статора $\Delta P_{\text{ст}}$, механические $\Delta P_{\text{мх}}$ и добавочные $\Delta P_{\text{д}}$. Полные потери в двигателе:

$$\Delta P = (\Delta P_{m1} + \Delta P_{m2}) + (\Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мх}} + \Delta P_{\text{д}}) = \Delta P_g + \Delta P_C, \quad (\text{П } 7.1)$$

где ΔP_g – переменные потери, Вт;

ΔP_C – постоянные потери, Вт.

При изменении нагрузки двигателя, уровня напряжения все составляющие меняются. При этом потери в обмотках (меди) статора и ротора пропорциональны квадрату тока и называются переменными ΔP_g . При нагрузке в пределах от холостого хода до номинальной нагрузки следует учитывать только потери в стали статора $\Delta P_{\text{ст}}$, так как при обычных частотах в роторе (1...5 Гц) потери в его стали малы. При увеличении нагрузки сумма потерь $\Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мх}}$ несколько уменьшается вследствие уменьшения основного магнитного потока, а также уменьшения скорости вращения. Обычно это уменьшение не превышает 4...8 %, поэтому данные потери относят к постоянным потерям двигателя ΔP_C . Потери в стали $\Delta P_{\text{ст}}$ зависят от напряжения и в первом приближении прямо пропорциональны ему. Так называемые постоянные потери составляют в электри-

ческих машинах 50...100 % от номинальных переменных потерь и оцениваются коэффициентом $\alpha = \Delta P_C / \Delta P_g$.

В общей сложности, в двигателях малой и средней мощности все потери могут достичь 20...30 % от потребляемой мощности.

КПД асинхронного двигателя зависит нагрузки и изменяется от нуля до максимального значения. Максимум КПД достигается при равенстве постоянных и переменных потерь. Машины конструируют так, что максимум КПД при номинальном напряжении наблюдается при 75% нагрузки. КПД двигателей с короткозамкнутым ротором на 2 ... 3% выше, чем у двигателей с фазным ротором. При уменьшении напряжения уменьшаются постоянные потери, поэтому при малых нагрузках КПД может возрасти. Если же момент сопротивления на валу близок к номинальному, переменные потери могут возрасти больше, чем снизятся постоянные.

Асинхронный двигатель (как и трансформатор) потребляет из сети отстающий ток, почти не зависящий от нагрузки. Поэтому его коэффициент мощности ($\cos\phi$) всегда меньше единицы. При холостом ходе $\cos\phi$ обычно не превышает 0,2...0,3, но затем при нагрузке он растет и достигает максимума при номинальной нагрузке. При увеличении напряжения $\cos\phi$ уменьшается. При увеличении скольжения выше номинального $\cos\phi$ также уменьшается. При неподвижном роторе коэффициент мощности не превышает 0,4...0,5.

В целях экономии электроэнергии двигатель должен быть загружен так, чтобы его КПД был наибольшим при фактически поддерживаемом уровне напряжения. Если двигатель загружен меньше, чем на 40%, то надо его менять или подавать пониженное напряжение, если есть такая техническая возможность. Существуют специальные регуляторы напряжения, предназначенные для автоматического поддержания $\cos\phi$ и КПД на максимальном уровне в зависимости от нагрузки на валу. При холостом ходе электродвигателя они автоматически уменьшают напряжение на электродвигателе, обеспечивая энергосбережение.

НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ

Допустимая мощность электродвигателя определяется его температурным режимом. Температурный режим является одним из решающих факторов при выборе электродвигателей по мощности.

Нагревание электродвигателя в электроприводе обусловлено потерями, возникающими в нем при преобразовании электрической энергии в механическую. При работе электродвигателя его температура постоянно повышается и превышает температуру окружающей среды. В качестве стандартной температуры окружающей среды принимается температура θ_0 , равная 40 °С.

Условия нагревания отдельных частей работающего электродвигателя различны; нагреваются больше обычно те части обмотки, которые находятся во внутренних областях машины. Предельно допустимая температура нагревания двигателя ограничивается качеством материала изоляции обмоток. Незначительное превышение рабочей температуры изоляции над предельно допустимой ($\theta_{\text{доп}}$) резко сокращает срок ее службы. Например, перегрев на 8–10 °С сокращает срок службы обмоток в 2 раза.

Двигатели малой и средней мощности, применяемые ранее в сельском хозяйстве серии А02, выполнялись главным образом с изоляцией классов А и Е, а современные двигатели серии 4А и АИР – с изоляцией классов В и F.

Каждый класс изоляции характеризуется своей предельно допустимой температурой $\theta_{\text{доп}}$ (Е – 120 °С; В – 130 °С; F – 155 °С).

Однако предельно допустимая температура отдельных частей электрической машины, например, обмотки или сердечника, принимается меньшая (с некоторым запасом на неточность измерения).

Нормированное превышение температуры τ_n изоляции обмоток электрических машин следующее: А – 60 °С; Е – 75 °С; В – 80 °С; F – 100 °С.

Установившееся превышение температуры двигателя зависит только от мощности ΔP потерь АД и теплоотдачи A электродвигателя.

Метод трех температур

Опытным путем, через равные промежутки времени Δt находят на кривой нагрева температуры τ_1, τ_2, τ_3 (рисунок П 8.2, б). T_n определяют по формуле:

$$T_n = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_3 - \tau_2}}. \quad (\text{П } 8.2)$$

Преимущество этого метода перед другими состоит в том, что им можно пользоваться даже в случае, если не известна установившаяся температура.

Определение T_n интегральным методом

На кривой нагрева (ближе к концу) выбирается точка A . Находится температура τ_A и площадь S (заштрихована на рисунке П 8.4). T_n определяется по формуле:

$$T_n = \frac{S}{\tau_A}. \quad (\text{П } 8.3)$$

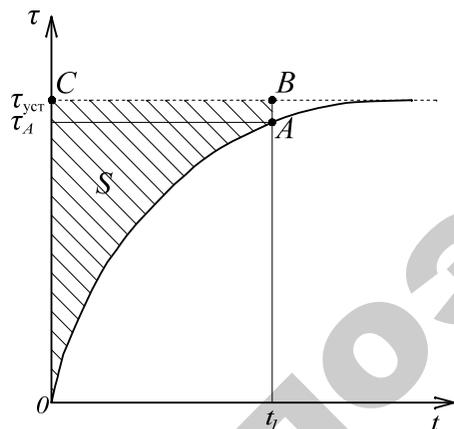


Рисунок П 8.3. Определение T_n интегральным методом

Метод касательных для определения T_n и T_o

Метод применяется, если известна температура $\tau_{уст}$. Проводят касательную к любой точке кривой нагрева. Например, на рисунке П 8.5 касательную проводят в начале кривой, посередине и в конце (точки θ, a, δ). Этот метод применяется и для определения постоянной времени охлаждения T_o .

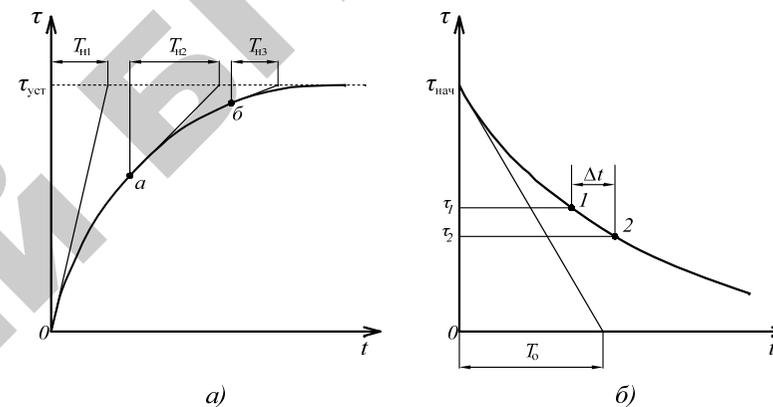


Рисунок П 8.4. Определение постоянной времени нагревания T_n и охлаждения T_o по методу касательной (а) и по методу двух температур (б)

Метод двух температур для определения T_o

Расчет производится по формуле (смотри рисунок П. 8.4, б):

$$T_o = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\tau_1}{\tau_2}}. \quad (\text{П } 8.4)$$

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ В ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	4
1.1. Общие положения	4
1.2. Правила техники безопасности	5
1.3. Порядок выполнения и сдачи лабораторных работ	6
1.4. Требования к оформлению отчетов по лабораторной работе ..	8
2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	11
2.1. Измерение частоты вращения электродвигателей	11
2.2. Создание нагрузки на валу электродвигателей, измерение момента и определение мощности на валу электродвигателей	15
2.3. Рекомендации по выбору измерительных приборов, реостатов, проводов	19
2.4. Маркировка обмоток электродвигателей	22
3. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ	24
Лабораторная работа № 1 Определение механической характеристики центробежного вентилятора опытным путем	24
Лабораторная работа № 2 Исследование механических и электромеханических характе- ристик асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором при разных напряжениях	32
Лабораторная работа № 3 Исследование механических и энергетических характеристик двухскоростного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором	40
Лабораторная работа № 4 Исследование механических и электромеханических характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения	47
Лабораторная работа № 5 Исследование электромеханических переходных процессов в электроприводе с асинхронным электродвигателем	53

Лабораторная работа № 6 Исследование динамического торможения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором	60
Лабораторная работа № 7 Исследование энергетических характеристик асинхронного электродвигателя при разных напряжениях	68
Лабораторная работа № 8 Исследование переходных процессов нагрева и охлаждения электродвигателя	75
ЛИТЕРАТУРА	82
ПРИЛОЖЕНИЯ	83

Учебное издание

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Лабораторный практикум

В двух частях

Часть 1

Составители:

Гурин Владимир Владимирович,
Бабаева Елена Владимировна

Ответственный за выпуск *А.В. Дайнеко*

Редактор *Н. А. Антипович*

Верстка *А.И. Стебуля*

Подписано в печать 09.04.2009 г. Формат 60×84¹/₁₆.

Бумага офсетная. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 6,51. Уч.-изд. л. 5,09. Тираж 150 экз. Заказ 945.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».

ЛИ № 02330/0131734 от 10.02.2006.

ЛП № 02330/0131656 от 02.02.2006.

Пр. Независимости, 99–2, 220023, Минск.