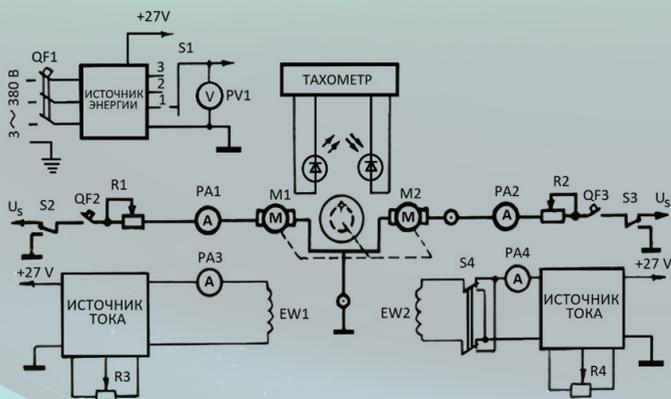


Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет

М.Н. Третьякова

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

Лабораторный практикум



© Третьякова М.Н., 2025

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», 2025

ISBN 978-5-8259-1683-5

УДК 62-83(075.8)

ББК 31.291я73

Рецензенты:

директор ООО «ЭнергоМонтаж» *А.А. Шмыров*;

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехника» Тольяттинского государственного университета

В.В. Вахнина.

Третьякова, М.Н. Электрический привод : лабораторный практикум / М.Н. Третьякова. – Тольятти : Издательство ТГУ, 2025. – 1 оптический диск. – ISBN 978-5-8259-1683-5.

В лабораторном практикуме представлены краткие теоретические сведения, описания лабораторных стендов, цели и программы цикла лабораторных работ. Изложена методика экспериментальных исследований электроприводов с аналоговым и цифровым управлением. Даны методические указания по подготовке и выполнению лабораторных работ и вопросы для самоконтроля.

Практикум предназначен для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8/10; PIII 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; CD-ROM; Adobe Acrobat Reader; интернет-браузер.

© Третьякова М.Н., 2025

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», 2025

Учебное издание

Третьякова Марина Николаевна

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

Редактор *Е.В. Пилясова*

Технический редактор *Н.П. Крюкова*

Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*

Художественное оформление,

компьютерное проектирование: *И.И. Шишкина*

В оформлении пособия использовано изображение
от pikisuperstar на сайте ru.freepik.com

Дата подписания к использованию 14.02.2025.

Объем издания 4,6 Мб.

Комплектация издания: компакт-диск, первичная упаковка.

Тираж 50 экз. Заказ № 1-44-23.

Издательство Тольяттинского государственного университета

445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,

тел. 8 (8482) 44-91-47, www.tltsu.ru

Содержание

Введение	5
Методические указания по выполнению цикла лабораторных работ	8
Лабораторная работа 1. Основные характеристики и принципы регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока	12
Лабораторная работа 2. Режимы работы и характеристики торможения двигателя постоянного тока	27
Лабораторная работа 3. Замкнутая система электропривода с вентильным двигателем	37
Лабораторная работа 4. Широтно-импульсное управление двигателем постоянного тока	46
Лабораторная работа 5. Асинхронный электропривод с частотным управлением	58
Рекомендуемая литература	66
Приложение А	67
Приложение Б	68

ВВЕДЕНИЕ

Учебный курс «Электрический привод» входит в блок обязательных дисциплин учебного плана подготовки бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профили «Электроснабжение» и «Цифровые технологии в электроэнергетике»).

Курс предназначен для формирования общепрофессиональной компетенции (ОПК-3), заключающейся в способности использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин. О сформированности компетенции можно судить по тому, что студент анализирует установившиеся режимы работы вращающихся электрических машин различных типов, использует знание этих режимов работы и характеристик (индикатор – ОПК-3.5).

Цель освоения дисциплины «Электрический привод» – подготовка к самостоятельному решению задач, связанных с выбором, исследованием, анализом режимов работы и эксплуатацией вращающихся электрических машин и электроприводов.

Задачи дисциплины:

- дать сведения об основах механики электропривода;
- сформировать представление о роли электрических машин в системе электропривода;
- научить понимать принципы работы электроприводов различных типов и принципы управления их координатами;
- дать сведения о структурах автоматизированных и автоматических систем электроприводов;
- научить проводить анализ характеристик и делать выбор элементов электроприводов в соответствии с заданными требованиями.

В результате изучения дисциплины обучающиеся должны:

- знать основные типы вращающихся электрических машин, их математическое описание, основные характеристики, схемы включения и режимы работы; назначение и элементную базу электроприводов переменного и постоянного тока; критерии выбора электроприводов в соответствии с техническим заданием;

– уметь анализировать требования нагрузки, рассчитывать параметры, характеристики и создавать простые модели электроприводов;

– владеть навыком проведения лабораторных испытаний и навыком анализа режимов работы вращающихся электрических машин и электроприводов.

Цель настоящего лабораторного практикума — подготовка обучающихся к решению профессиональных задач путем практического изучения современных и перспективных структур электропривода, посредством приобретения умений и навыков расчета характеристик и режимов работы вращающихся электрических машин и электроприводов.

Задачи лабораторного практикума:

- оптимизировать теоретическую подготовку обучающихся по изучаемым типам электрических приводов;
- обеспечить методическое руководство экспериментами на специализированных лабораторных стендах;
- систематизировать деятельность обучающихся по обработке, анализу и представлению результатов лабораторных исследований.

На данном уровне развития техники вопросы эффективного использования энергии выходят на первый план. Электрический привод относится к одной из самых многочисленных групп электроприемников.

«Электропривод осуществляет необходимые движения в механообрабатывающих станках, различных перерабатывающих машинах, транспортных средствах, в подъемных установках, а также устройствах первичной обработки сырья, в приборах и аппаратах точной механики и прочих промышленных установках. Поэтому современными и перспективными можно считать структуры электропривода, обеспечивающие требуемое движение технологических машин и установок с минимальными потерями энергии. В частности, это системы автоматизированного и автоматического электропривода» [1], [2].

Особенность систем автоматизированного и автоматического электропривода состоит в том, что необходимая для преобразования и регулирования энергии обработка информации осуществ-

вляется в них автоматически. Благодаря применению систем автоматизированного и автоматического электропривода человек, с одной стороны, освобождается от тяжелого физического труда, а с другой — с него снимаются функции переработки информации и принятия действий по управлению. В связи с этим практическое изучение и исследование электроприводов с аналоговым и цифровым управлением, включая электроприводы переменного тока с частотным управлением, в лабораторных условиях является актуальной задачей при подготовке специалистов современного уровня.

Настоящий практикум содержит материалы для выполнения цикла лабораторных работ дисциплины «Электрический привод». В лабораторных работах рассмотрены вопросы экспериментальных исследований статических и динамических режимов работы электроприводов с двигателем постоянного тока, с вентильным двигателем и с асинхронным двигателем и частотным преобразователем. Имеются краткие теоретические сведения, описания лабораторных стендов, порядок выполнения работ, содержание отчетов и контрольные вопросы к защите каждой работы.

Выполнение лабораторных работ предполагает самостоятельное предварительное изучение методических материалов и рекомендуемых литературных источников, а также проведение необходимых расчетов, построение графиков и анализ характеристик.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЦИКЛА ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Общие сведения

В данном цикле предусматривается выполнение пяти лабораторных работ на специализированных лабораторных стендах.

Лабораторные работы являются одной из форм текущей аттестации. Перед выполнением лабораторных работ проводится допуск, в ходе которого оценивается степень подготовки обучающихся к проведению эксперимента. В конце занятия проводится проверка выполнения обучающимися программы лабораторной работы. По каждой работе оформляется отчет и проводится защита результатов работы, в ходе которой осуществляется оценка степени освоения учебного материала обучающимися. Баллы за отчет о лабораторных работах входят в текущий рейтинг и учитываются при расчете итогового балла за курс.

Перечень отчетов о лабораторных работах

Составляющими лабораторного цикла являются:

- лабораторная работа 1 «Основные характеристики и принципы регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока»;
- лабораторная работа 2 «Режимы работы и характеристики торможения двигателя постоянного тока»;
- лабораторная работа 3 «Замкнутая система электропривода с вентильным двигателем»;
- лабораторная работа 4 «Широтно-импульсное управление двигателем постоянного тока»;
- лабораторная работа 5 «Асинхронный электропривод с частотным управлением».

Результаты лабораторных исследований изучаемых электроприводов представляются в виде отчетов. Типовой отчет о лабораторной работе должен состоять из следующих составляющих:

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Задачи работы.

4. Результаты исследования.
5. Выводы.
6. Список используемых источников.

В прил. А и Б даны примеры оформления титульного листа и основных разделов отчета о лабораторной работе.

Краткое описание лабораторных занятий и регламент выполнения лабораторных работ

Для выполнения лабораторных работ формируются команды (бригады). Каждая команда (бригада) проводит исследование на своем лабораторном стенде.

Отчет о лабораторной работе выполняется каждым обучающимся индивидуально. Оформляется в печатном виде на листах формата А4.

К защите допускаются обучающиеся, представившие распечатанный отчет о лабораторной работе.

Защита отчета о лабораторной работе производится всеми членами команды (бригады) одновременно. Преподаватель оценивает качество выполнения отчета о лабораторной работе (содержание и форму), представленного каждым из обучающихся членов команды (бригады).

Преподаватель задает вопросы по теме лабораторной работы и оценивает знание учебного материала, продемонстрированное обучающимися при ответе на вопросы и обсуждении полученных результатов исследования.

Критерии оценки лабораторных работ

Оценки за лабораторные занятия выставляются в баллах. На первом лабораторном занятии осуществляется знакомство с лабораторными стендами и проводится инструктаж обучающихся по технике безопасности. В конце занятия проводится устный опрос для контроля эффективности работы обучающихся. При этом обучающимся выставляется:

- 2 балла – при правильном ответе на два вопроса;
- 1 балл – при правильном ответе на один вопрос.

Перед выполнением лабораторных работ проводится допуск, в ходе которого оценивается степень подготовки обучающихся к проведению эксперимента. В конце занятия проводится проверка выполнения обучающимися программы лабораторной работы.

За качество предварительной подготовки и выполнение каждой лабораторной работы выставляется:

– 3 балла – подготовлен качественный бланк отчета, при допуске к работе даны корректные ответы на вопросы, программа работы выполнена полностью;

– 2 балла – качественный бланк отчета не подготовлен, но при допуске к работе даны корректные ответы на вопросы и программа работы выполнена полностью;

– 1 балл – не подготовлен бланк отчета, при допуске к работе не даны корректные ответы на вопросы, но программа работы выполнена.

За защиту каждой лабораторной работы выставляется:

– 5 баллов – работа выполнена и защищена в соответствии с календарным планом, оформлена качественно, даны правильные и развернутые ответы на контрольные вопросы;

– 4 балла – работа выполнена и защищена в соответствии с календарным планом, оформлена качественно, даны развернутые ответы на контрольные вопросы; в ответах на вопросы допущены незначительные ошибки;

– 3 балла – работа выполнена и защищена в соответствии с календарным планом, оформлена качественно, даны развернутые ответы на контрольные вопросы; в ответах на вопросы допущены существенные ошибки;

– 2 балла – работа выполнена и защищена с нарушением календарного плана, оформлена небрежно, в ответах на вопросы допущены существенные ошибки;

– 1 балл – работа выполнена и сдана с нарушением календарного плана, оформлена без учета требований ЕСКД, в ответах на вопросы допущены существенные ошибки.

Требования по технике безопасности

Приборные блоки стендов подключаются к трехфазной электрической сети напряжением 380 В, что создает опасность электротравматизма.

Причинами поражения электрическим током могут быть: случайное прикосновение к находящимся под напряжением токоведущим частям; появление напряжения на металлических частях электрооборудования при повреждении изоляции.

Во избежание электротравматизма при работе на стендах:

– необходимо: получить разрешение от преподавателя на допуск к выполнению работы; предупреждать других обучающихся о включении автоматического выключателя и подаче питания на стенд; не касаться открытых токоведущих частей; следить за надежностью крепления заземляющего провода к корпусу оборудования;

– запрещается: работать влажными руками или протирать влажными материалами элементы стендов, включенных в сеть.

Лабораторная работа 1

Основные характеристики и принципы регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока

Цель работы – практическое изучение электромеханических свойств, механических характеристик и принципов регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

Указания по выполнению самостоятельной работы

При подготовке к лабораторной работе необходимо по учебникам [1] и [2], конспектам лекций изучить тему «Схемы включения, механические характеристики и принципы регулирования скорости вращения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением» и подготовить ответы на контрольные вопросы, а также изучить порядок включения стенда и выполнения лабораторной работы 1.

Краткие теоретические сведения

Схема включения и характеристики двигателя

«В зависимости от способа возбуждения двигателя постоянного тока (ДПТ) бывают с независимым, последовательным, параллельным и смешанным возбуждением. Схема включения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ с НВ) представлена на рис. 1» [1].

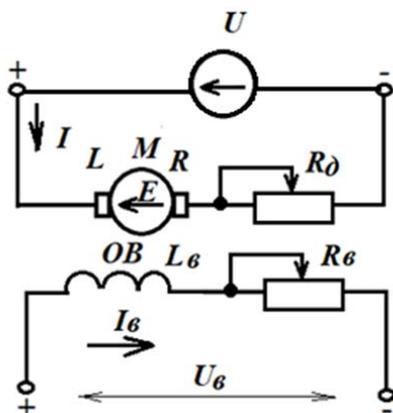


Рис. 1. Схема включения ДПТ с НВ

«Работа ДПТ с НВ в статическом режиме описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned} U &= E + I \cdot R; \\ E &= k \cdot \Phi \cdot \omega = c \cdot \omega; \\ M &= k \cdot \Phi \cdot I = c \cdot I, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где U – подводимое к якору напряжение, В; E – противо-ЭДС двигателя, В; I – ток в якорной цепи, А; $R = R_a + R_d$ – полное сопротивление якорной цепи двигателя, учитывающее сопротивление якоря R_a и добавочное сопротивление резистора R_d , Ом; M – электромагнитный момент, Н · м; Φ – магнитный поток, Вб; $k = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a}$ – конструктивный коэффициент, зависящий от числа пар полюсов двигателя p , числа активных проводников N и числа параллельных ветвей a обмотки якоря.

Сопротивление якоря представляет собой сумму сопротивлений:

$$R_a = R_{о\text{я}} + R_{д\text{п}} + R_{к\text{о}} + R_{щ}, \quad (1.2)$$

где $R_{о\text{я}}$ – сопротивление обмотки якоря; $R_{д\text{п}}$ – сопротивление добавочных полюсов; $R_{к\text{о}}$ и $R_{щ}$ – сопротивления компенсационной обмотки и щеточного контакта соответственно.

Из системы уравнений (1.1) можно получить уравнение электромеханической (скоростной) характеристики ДПТ с НВ:

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{R}{k \cdot \Phi} \cdot I. \quad (1.3)$$

Подставив в уравнение (1.3) значение тока $I = \frac{M}{k \cdot \Phi} = \frac{M}{c}$, получим уравнение $\omega = f(M)$ механической характеристики электродвигателя постоянного независимого возбуждения (4):

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{R}{(k \cdot \Phi)^2} \cdot M = \frac{U}{c} - \frac{R}{c^2} \cdot M = \omega_0 - \frac{R}{c^2} \cdot M, \quad (1.4)$$

где $\omega_0 = \frac{U}{c}$ – угловая скорость идеального холостого хода ДПТ с НВ» [1].

«Так как в статическом режиме вращающий момент равен моменту сопротивления M_c , то уравнение (1.4) определяет зависимость ω от M . Следует отметить, что электромагнитный момент M

превышает выходной момент на валу ДПТ на величину, соответствующую потерям в стали и механическим потерям от трения» [1].

На рис. 2 изображено семейство механических характеристик ДПТ с НВ. Характеристики имеют вид прямых линий.



Рис. 2. Механические характеристики ДПТ с НВ

«Если $U = U_{\text{ном}}$, $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$ и $R_{\text{д}} = 0$, то соответствующая механическая характеристика ДПТ с НВ называется естественной. При изменении хотя бы одного из указанных параметров механическая или электромеханическая характеристика называется искусственной. Таким образом, можно отметить, что ДПТ с НВ обладает лишь одной естественной характеристикой и множеством искусственных. С учетом пропорциональной связи между током I и моментом M следует, что механические и электромеханические характеристики отличаются только масштабом» [1].

Анализ уравнений. Построение электромеханической и механической характеристик

«Из уравнения (1.3) следует, что при $I = 0$ наступает режим идеального холостого хода. Угловая скорость вращения идеального холостого хода равна

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} = \omega_0 = \frac{U}{c}. \quad (1.5)$$

С увеличением нагрузки на валу ДПТ возрастает и ток якоря I , так как $M = c \cdot I$, что ведет к падению скорости ω . В случае, когда

$\omega = 0$ (якорь неподвижен), а напряжение к якорю подведено, имеет место режим короткого замыкания. Ток электродвигателя в этом режиме очень большой, так как напряжение питания ограничивается только сопротивлением якоря:

$$I = I_{\text{кз}} = I_{\text{пуск}} = U/R. \quad (1.6)$$

Максимальное значение тока короткого замыкания имеет место при $R_{\text{д}} = 0$, когда $R = R_{\text{а}} + R_{\text{д}} = R_{\text{а}} + 0 = R_{\text{а}}$, и оно может превышать в десятки раз величину номинального тока двигателя, так как значение собственного сопротивления якоря ДПТ НВ $R_{\text{а}}$ весьма мало. В процессе работы режим короткого замыкания возникает при пуске и при стопорении двигателя за счет момента сопротивления на валу» [1].

«Электромагнитный момент короткого замыкания двигателя при номинальных значениях напряжения в цепях возбуждения и обмотки якоря определяются выражением

$$M_{\text{кз}} = \frac{k \cdot \Phi_{\text{ном}} \cdot U_{\text{ном}}}{R}. \quad (1.7)$$

При прямом пуске двигателя ударные значения тока $I_{\text{кз}} \gg I_{\text{ном}}$, поэтому якорная обмотка может быстро перегреться и выйти из строя. Кроме того, большие токи негативно влияют на работоспособность щеточно-коллекторного узла. Сказанное обуславливает необходимость ограничения $I_{\text{кз}}$ до приемлемой величины, либо введение дополнительного сопротивления в якорную цепь $R_{\text{д}}$, либо уменьшение питающего напряжения U » [1].

Величина максимально допустимого тока определяется коэффициентом перегрузки по току $K_{\text{т}}$, обычно принимающим значение от 2 до 5 в зависимости от типа двигателя.

Максимально допустимый ток короткого замыкания должен соответствовать неравенству $I_{\text{кз}} \leq K_{\text{т}} \cdot I_{\text{ном}}$.

При наличии паспортных данных электродвигателя механическую или электромеханическую характеристику можно построить по двум точкам, соответствующим номинальному режиму и идеальному холостому ходу машины. Координаты номинального режима работы определяются на основе номинальных данных электродви-

гателя. Номинальная скорость вращения может быть рассчитана по формуле

$$\omega_{\text{НОМ}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{НОМ}}}{60}, \quad (1.8)$$

где $n_{\text{НОМ}}$ — номинальная частота вращения, об/мин.

Номинальный момент — по формуле

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}}, \quad (1.9)$$

где $P_{\text{НОМ}}$ — номинальная мощность электродвигателя, Вт.

Для расчета скорости идеального холостого хода требуется определить значение коэффициента $c = k \cdot \Phi_{\text{НОМ}}$, что можно сделать по формуле

$$c = k \cdot \Phi_{\text{НОМ}} = \frac{M_{\text{НОМ}}}{I_{\text{НОМ}}}. \quad (1.10)$$

Скорость холостого хода равна

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{НОМ}}}{k \cdot \Phi_{\text{НОМ}}}. \quad (1.11)$$

Под нагрузкой, то есть при появлении момента сопротивления, скорость двигателя падает до тех пор, пока его момент не сравняется с моментом сопротивления нагрузки (M_c): ω — уменьшается, $E = k \cdot \Phi \cdot \omega$ — падает, $I = \frac{U-E}{R}$ — растет, что приводит к возрастанию электромагнитного момента $M = k \cdot \Phi \cdot I$. При $M = M_c$ переходный процесс заканчивается.

Разность статических скоростей электропривода называется статическим падением скорости и рассчитывается согласно выражению

$$\Delta\omega = \frac{R}{(k \cdot \Phi)^2} \cdot M. \quad (1.12)$$

При использовании этого обозначения уравнение (5) приобретает вид:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega. \quad (1.13)$$

Жесткость механической характеристики электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения равна

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta\omega} = \frac{\Delta M \cdot (k \cdot \Phi)^2}{R \cdot M} = \frac{(k \cdot \Phi)^2}{R}. \quad (1.14)$$

С использованием (1.14) уравнение механической характеристики приобретает вид:

$$\omega = \omega_0 - \frac{M}{\beta}. \quad (1.15)$$

Выражение (1.14) показывает, что жесткость механической характеристики электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения меняется при изменении величины потока (тока возбуждения) и сопротивления якорной цепи, но не зависит от величины напряжения, подаваемого на якорь.

Способы регулирования угловой скорости ДПТ с НВ

Регулирование – это целенаправленное изменение скорости ω в соответствии с требованиями технологического процесса и независимо от нагрузки. Естественное изменение ω под действием момента сопротивления нагрузки не входит в понятие регулирования скорости.

«Из уравнения механической характеристики (1.4) следует, что ω может регулироваться напряжением на якоре U , величиной магнитного потока Φ и сопротивлением якорной цепи R .

Важнейшей характеристикой регулирования скорости является диапазон D регулирования. Это отношение максимальной и минимальной возможных скоростей электропривода при заданной точности регулирования:

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}. \quad (1.16)$$

Диапазон регулирования представляют в числах в виде отношения скоростей, например 100 : 1 и т. д.» [1].

1. Регулирование скорости вращения двигателя изменением питающего напряжения

«Как следует из уравнения (1.4), при изменении питающего напряжения изменяется величина скорости холостого хода. В результате можно получить семейство механических характеристик (рис. 3)» [1].

«Поскольку в процессе регулирования напряжение по отношению к номинальному можно только уменьшать, то скорость вращения при изменении напряжения на якоре ДПТ регулируется только вниз от естественной характеристики. Это обусловлено тем, что уже

на стадии своего проектирования ДПТ рассчитывается на конкретное номинальное напряжение и его превышение может привести к пробое изоляции» [1].

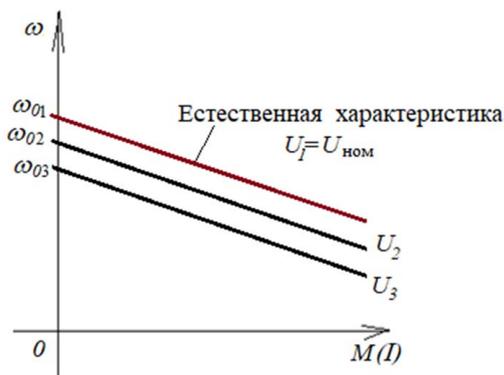


Рис. 3. Механические характеристики ДПТ с НВ при различных напряжениях: $U_1 = U_{\text{ном}} > U_2 > U_3$

Напряжение на якоре можно регулировать с помощью различных статических устройств, таких как управляемые выпрямители, импульсные преобразователи и т. п.

2. Регулирование угловой скорости вращения изменением потока возбуждения

«При введении добавочного сопротивления R_B в цепь обмотки возбуждения можно изменить величину магнитного потока двигателя Φ в сторону уменьшения от его номинального значения $\Phi_{\text{ном}}$, которое имеет место при $R_B = 0$.

Из уравнения электромеханической характеристики (1.2) видно, что для различных значений потока Φ можно получить семейство электромеханических характеристик, представленное на рис. 4.

На рис. 4 нижняя характеристика соответствует номинальному потоку возбуждения $\Phi_{\text{ном}}$. Если при этом добавочное сопротивление в якорной цепи $R_d = 0$ и на якорь подается номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, то эта характеристика будет естественной. При уменьшении величины потока возбуждения угловые скорости вращения холостого хода возрастают в соответствии с выражением (1.4). Ток короткого замыкания при этом остается неизменным» [1].

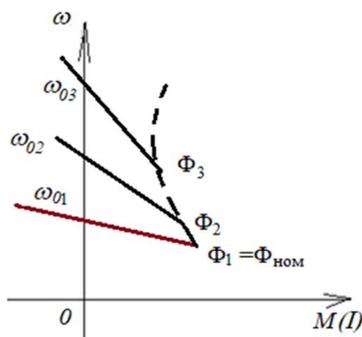


Рис. 4. Механические (электромеханические) характеристики ДПТ с НВ при различных потоках: $\Phi_1 = \Phi_{\text{ном}} < \Phi_2 < \Phi_3$

«Пусковой момент определяется выражением $M_{\text{п}} = \frac{k \cdot \Phi \cdot U}{R}$, поэтому $M_{\text{п}}$ уменьшается с уменьшением величины потока возбуждения Φ . На практике этот способ используется только для регулирования угловой скорости вращения вверх от основной» [1].

3. Реостатное регулирование угловой скорости вращения

«Реостатное регулирование является одним из простейших способов регулирования угловой скорости вращения. Для его осуществления необходимо в цепи якоря регулировать величину добавочного сопротивления. Из уравнения механической характеристики (1.4) следует, что при постоянном моменте сопротивления $M_{\text{с}}$ на валу можно получить различные установившиеся угловые скорости ниже основной. Жесткость искусственных реостатных механических характеристик, как можно видеть на рис. 2, уменьшается с увеличением величины добавочного сопротивления $R_{\text{д}}$ » [1].

«Диапазон регулирования скорости изменением сопротивления якоря не превышает 2:1. Способ характеризуется большими потерями электроэнергии на добавочном сопротивлении $R_{\text{д}}$ » [1].

Описание лабораторного стенда

Стенд состоит из электромеханического агрегата и приборного блока, соединенных между собой двумя силовыми и одним измерительным кабелем. Надписи на стенде переводятся следующим образом:

POWER – энергия; SUPPLYVOLTAGE – напряжение питания; TACHOMETER – тахометр; SPEED, rad/s – скорость, рад/с; CURRENT SOURCE – источник тока; ARMATURE CURRENT – ток якоря; EXCITING CURRENT – ток возбуждения; STEP VOLTAGE – шаговый переключатель напряжения; HAND CONTROL – ручное управление; CMPT – компьютер; PHOTOELECTRIC TRANSDUSER – фотоэлектрический преобразователь; POWER SUPPLY – источник энергии; TEST MOTOR – исследуемый двигатель; BRAKE MOTOR – тормозной двигатель; ON – включено; OFF – выключено.

Приборный блок подключается к трехфазной сети напряжением 380 В. Включение стенда к сети осуществляется автоматическим выключателем на левой боковой панели приборного блока, а измерение частоты вращения производится цифровым тахометром.

Как следует из электрической принципиальной схемы, изображенной на передней панели стенда (рис. 5), последовательно с якорными обмотками исследуемого $M1$ и нагрузочного $M2$ двигателей включены добавочные сопротивления $R1$ и $R2$.

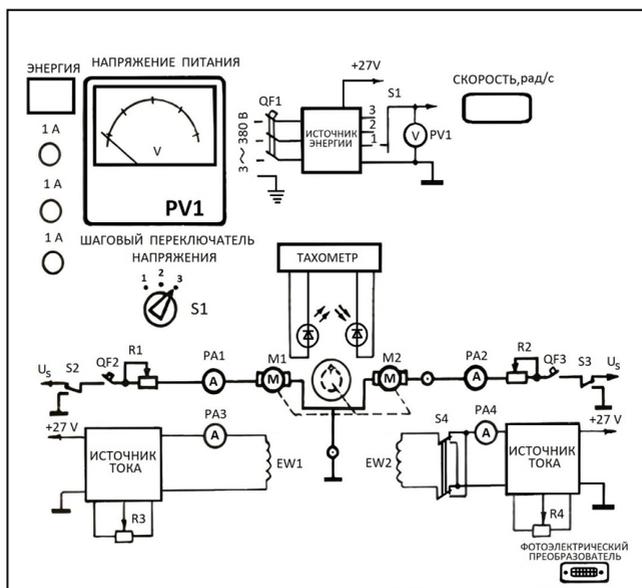


Рис. 5. Левая часть лицевой панели стенда

Величина добавочных сопротивлений $R1$ и $R2$ может ступенчато изменяться соответствующими переключателями на панели от нулевой до десятой ступени (рис. 6). Соответственно, $R1$ и $R2$ могут принимать по десять значений от 0 до 5 Ом с шагом 0,5 Ом. Значения сопротивлений (Ом) задаются согласно выражениям $R1 = 0,5 \cdot N$ и $R2 = 0,5 \cdot N$, где N – номер включенной ступени (0–10), определяемый по верхней цифре на ручке переключателя.

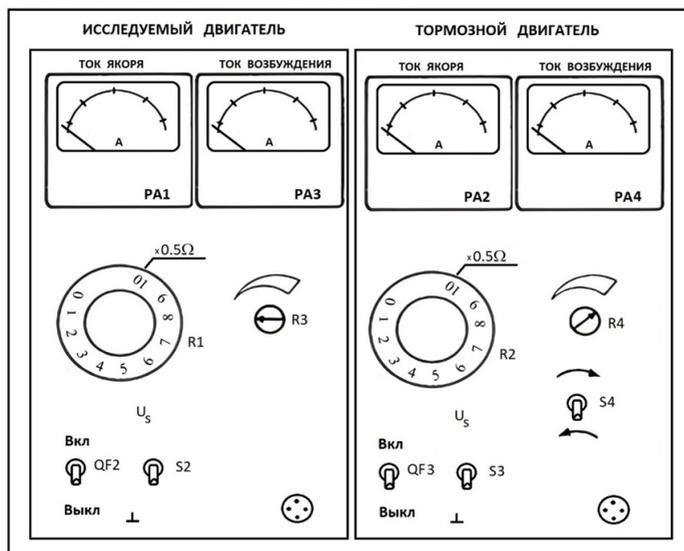


Рис. 6. Правая часть лицевой панели стенда

Программа работы

1. Проверить работоспособность стенда.
2. Экспериментально определить ток короткого замыкания двигателя.
3. Экспериментально определить зависимость коэффициента двигателя $c = k \cdot \Phi$ от тока возбуждения I_B .
4. Снять естественную механическую и электромеханическую характеристики для двигательного режима работы ($U = 27$ В).
5. Произвести регулирование угловой скорости двигателя изменением якорного напряжения $U = \text{var}$ и $I_B = \text{const}$.

6. Осуществить регулирование угловой скорости двигателя изменением потока возбуждения.
7. Определить модули жесткости механических характеристик.

Указания и пояснения по выполнению работы

Проверка работоспособности стенда

1. Изучите принципиальную схему стенда.
2. Переведите все тумблеры на панели в нижнее положение.
3. Включите автомат *QF1* на левой боковине приборного блока, при этом должен загореться индикатор POWER (ЭНЕРГИЯ).
4. Переключатель *S1* STEPVOLTAGE (переключатель напряжения) поставьте в положение 3.

Проверка работы испытуемого двигателя M1

1. Проведите реостатный пуск испытуемого двигателя *M1*.

Алгоритм реостатного пуска двигателя *M1*

- Для осуществления реостатного пуска испытуемого двигателя *M1* переключатель *R1* установите в положение 10.
- Включите тумблер *S2* и установите потенциометром *R3* максимальное значение тока возбуждения по амперметру *PA3*.
- Включите автомат *QF2*. При этом должен вращаться исследуемый двигатель и на индикаторе должно появиться значение его скорости вращения.
- Проверьте регулируемость скорости вращения путем переключения *R1* в положение 0. При этом должна возрасти скорость вращения двигателя.

2. Разберитесь с физической сущностью процесса по электрической принципиальной схеме стенда.
3. Отключите *QF2* и переведите *R1* в положение 10.

Проверка работы нагрузочного двигателя M2

1. Повторите все вышеуказанные действия для проверки работы нагрузочного двигателя *M2*, пользуясь переключателем *R2*, потенциометром *R4*, автоматом *QF3* и тумблером *S3*. При этом положение тумблера *S4* не имеет значения.
2. Отключите двигатели.

**Экспериментальное определение тока короткого замыкания
(пускового тока) двигателя М1**

1. Используя паспортные данные двигателя $M1$, определите ток короткого замыкания и занесите результат в табл. 1 (графа $R1 = 0$).
2. Произведите реостатный пуск испытуемого двигателя $M1$ согласно рекомендациям, рассмотренным выше, и установите $R1$ в положение 3 ($R1 = 1,5 \text{ Ом}$).
3. Включите двигатель $M2$ ($S3$ и $QF3$ — включены) при полностью введенном сопротивлении $R2$ и токе возбуждения не менее $1,5 \text{ А}$.
4. Переключателем $R2$ добейтесь нулевого значения скорости вращения (если точно сделать это не удастся, то произведите регулировку потенциометром $R4$).
5. Снимите показания прибора $PA1$ и занести данные в табл. 1 (графа $R1 = 1,5 \text{ Ом}$).
6. Аналогично проделайте эксперимент для 5 и 7 положений переключателя $R1$. Результаты занесите в табл. 1.
7. Отключите двигатели.

Таблица 1

Ток короткого замыкания двигателя

$R1, \text{ Ом}$	0	1,5	2,5	3,5
$I_{кз}, \text{ А}$				

Экспериментальное определение зависимости $c = f(I_{a1})$

Коэффициент пропорциональности $c = k \cdot \Phi$, значение которого требуется для построения механических характеристик испытуемого двигателя, изменятся при регулировании тока возбуждения. Поэтому необходимо определить для двигателя $M1$ зависимость $c = f(I_{a1})$.

1. Произведите реостатный пуск только двигателя $M1$ по алгоритму, рассмотренному выше.
2. Установите $R1$ в положение 0.
3. Переведите двигатель $M1$ в режим идеального холостого хода, для чего включите нагрузочный двигатель $M2$ согласно с $M1$, при этом $S4$ включите в верхнее положение, а $R2$ — в положение 10.
4. Последовательно включите $S4$ и $QF3$.

5. Установите потенциометром $R4$ ток возбуждения $I_{e2} = 1,5$ А. Переключателем $R2$ добейтесь нулевого значения тока якоря $I_1 = 0$. Если с помощью $R2$ не удастся установить ток якоря, равный нулю, то для точной регулировки воспользуйтесь потенциометром $R4$.

6. Для заданных значений тока возбуждения I_{e1} снимите показания тахометра. Результаты запишите в табл. 2. Величину I_{e1} регулируйте потенциометром $R3$.

7. Отключите двигатели.

8. Используя данные табл. 2 и формулу расчета ω_0 , определите коэффициент $c = \frac{U}{\omega_0}$.

Таблица 2

Зависимость $c = f(I_{e1})$

$I_{e1}, \text{А}$	1,5	1,4	1,3	1,2	1,0	0,75
ω , рад/с						
U , В						
c , В/рад/с						

Экспериментальное определение естественных электромеханической и механической характеристик

1. Произведите реостатный пуск двигателя $M1$ и установите переключатель $R1$ в положение 0.

2. Переведите нагрузочный двигатель $M2$ в режим динамического торможения. Для этого переключите тумблер $S4$ в верхнее положение и выключите $S3$.

3. Установите переключатель $R2$ в положение 3.

4. Поверните до упора влево потенциометр $R4$ для обнуления тока возбуждения двигателя $M2$.

5. Включите автомат $QF3$.

6. Регулируя ток возбуждения двигателя $M2$ потенциометром $R4$, нагружайте исследуемый двигатель $M1$ до тока $I_1 = 10$ А (фиксируя по амперметру $PA1$ ток якоря I_1 и скорость вращения ω).

7. Ток цепи возбуждения двигателя $M1$ поддерживайте равным 1,5 А.

8. Результаты измерений для 5-6 значений тока якоря I_1 занесите в табл. 3.

Таблица 3

Электромеханическая $\omega = f(I_1)$ и механическая $\omega = f(M)$ характеристики для двигательного режима при $R1 = 0$ Ом

ω , рад/с						
I_1 , А						
M , Н·м						

Регулирование угловой скорости двигателя изменением напряжения на обмотке якоря

Внимание: контроль якорного напряжения осуществляется вольтметром *PV1*. Регулирование подводимого к якору двигателя напряжения производится переключателем *S1*.

1. Произведите реостатный пуск двигателя *M1* при отключенном *M2* по алгоритму, рассмотренному выше.
2. Измените установившуюся скорость двигателя *M1* путем перевода переключателя *S1* в каждое из трех имеющихся положений.
3. Результаты измерений занесите в табл. 4. Ток возбуждения двигателя *M1* должен быть неизменным и равным $I_{\sigma 1} = 1,5$ А.
4. Сделайте выводы.

Таблица 4

Зависимость $\omega = f(U)$

<i>S1</i> , положение	1	2	3
U , В			
ω , рад/с			

Регулирование угловой скорости двигателя изменением потока возбуждения

Внимание: контроль потока возбуждения испытуемого двигателя осуществляется через ток амперметра *PA3*.

1. Установите переключатель *S1* в положение 3.
2. При заданном токе возбуждения исследуемого двигателя *M1* ($I_{\sigma 1} = 1,5$ А, $I_{\sigma 1} = 1,0$ А и $I_{\sigma 1} = 0,5$ А) измерьте установившиеся значения скорости ω и ток якоря I_1 .
3. Результаты измерений занесите в табл. 5.
4. Сделайте выводы.

Данные регулирования скорости изменением потока

$I_{\text{с1}}, \text{ A}$	1,5	1,0	0,5
$\omega, \text{ рад/с}$			
$I_1, \text{ A}$			
$M, \text{ Н} \cdot \text{ м}$			

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Программа работы.
3. Схемы электропривода.
4. Результаты исследований (таблицы и графики снятых характеристик).
5. Выводы по работе.
6. Список используемых источников.

Контрольные вопросы

1. Назовите наиболее эффективные способы регулирования угловой скорости ДПТ с НВ.
2. Начертите схему реостатного пуска и регулирования угловой скорости ДПТ с НВ.
3. Укажите основные недостатки реостатного пуска и регулирования угловой скорости двигателя постоянного тока.
4. Способы пуска и регулирования угловой скорости ДПТ с НВ.
5. Вид естественной механической характеристики ДПТ с НВ.
6. Вид механических характеристик ДПТ с НВ при регулировании угловой скорости изменением якорного напряжения.
7. Какие параметры определяют модуль жесткости механической характеристики?
8. Регулирование угловой скорости двигателя ДПТ с НВ во второй зоне регулирования.
9. Укажите причины снижения угловой скорости ДПТ с НВ при увеличении нагрузки.
10. Какие механические характеристики ДПТ с НВ называют искусственными?

Лабораторная работа 2

Режимы работы и характеристики торможения двигателя постоянного тока

Цель работы — практическое изучение режимов и характеристик торможения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

Указания по выполнению самостоятельной работы

При подготовке к лабораторной работе необходимо по учебникам, конспектам лекций изучить тему «Схемы включения, механические характеристики и способы торможения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением» и подготовить ответы на контрольные вопросы, а также изучить особенности работы стенда и порядок выполнения лабораторной работы 2.

Краткие теоретические сведения

«Различают следующие тормозные режимы работы электродвигателей:

- рекуперативное (с отдачей энергии в сеть) торможение;
- динамическое торможение;
- торможение противовключением.

Рекуперативное торможение

Если сторонним устройством разогнать ДПТ с НВ до скорости выше скорости холостого хода $\omega > \omega_0$, то двигатель начнет работать генератором, включенным параллельно с сетью, отдавая в сеть электрическую энергию. Ток якоря $I = \frac{U-E}{R}$, а следовательно, и электромагнитный момент двигателя при этом изменят свой знак, так как $E > U$. ДПТ перейдет в тормозной режим с моментом $M_T = -M$. Уравнение механической характеристики (1.4) будет иметь вид:

$$\omega = \frac{U}{c} + \frac{R}{c^2} \cdot M_T. \quad (2.1)$$

Режиму рекуперативного торможения, как можно видеть на рис. 7, соответствуют участки механических характеристик, где $\omega > \omega_0$. Режим рекуперативного торможения является экономичным и широко применяется на практике» [1].

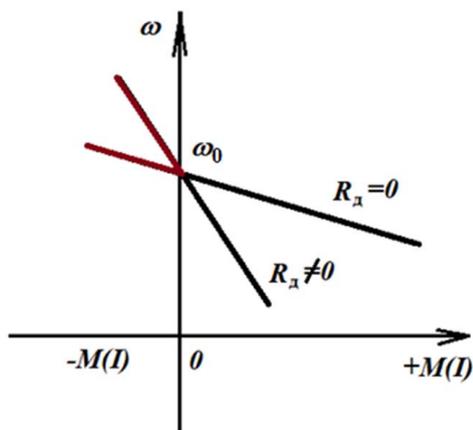


Рис. 7. Участки механических характеристик ДПТ с НВ, соответствующие режимам двигателя и рекуперативного торможения

Динамическое торможение

«Для осуществления этого режима якорь двигателя отключают от сети и замыкают на добавочное (тормозное) сопротивление так, как это представлено на рис. 8» [1].

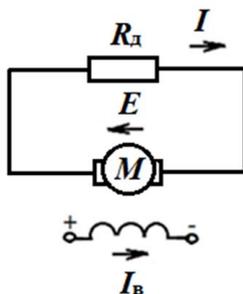


Рис. 8. Схема включения ДПТ при динамическом торможении

«В режиме динамического торможения уравнение механической характеристики будет иметь вид:

$$\omega = \frac{R}{c^2} \cdot M_T, \quad (2.2)$$

где M_T – тормозной момент; $R = R_a + R_d$ – полное сопротивление якорной цепи.

Ток якоря можно определить по формуле

$$I = -\frac{E}{R}. \quad (2.3)$$

Динамическое торможение – наиболее распространенный и достаточно экономичный способ торможения. В этом режиме двигатель работает генератором на постоянную нагрузку, потребляя из сети энергию только на возбуждение» [1].

При переводе ДПТ из двигательного режима (рис. 9, первый квадрант) в режим динамического торможения (рис. 9, второй квадрант) необходимо ограничивать величину максимального тормозного тока в момент переключения.

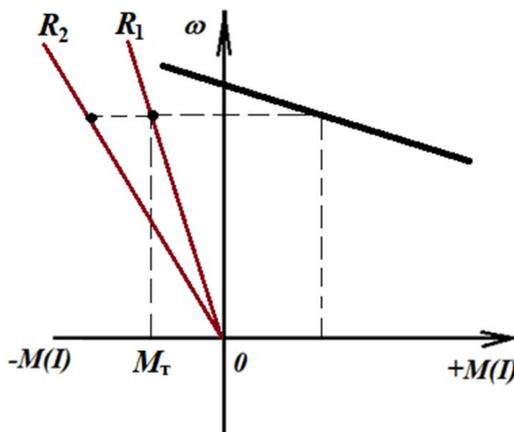


Рис. 9. Механические характеристики ДПТ с НВ в режиме динамического торможения при $R_1 > R_2$

Торможение противовключением

«В этом режиме ДПТ работает генератором последовательно с сетью. Противовключение наступает тогда, когда обмотки двигателя включены для вращения в одну сторону, но под действием внешнего момента или сил инерции якорь вращается в противоположную сторону» [1]. В результате знак ЭДС якоря изменяется на противоположный. Ток якоря увеличивается в соответствии со следующим выражением:

$$I = \frac{U + E}{R}. \quad (2.4)$$

Так как ток якоря может превысить допустимое значение, то для его ограничения в цепь якоря вводят добавочное сопротивление R_d . Рассмотренный режим, наступающий за счет увеличения активной нагрузки на валу до значений, превышающих момент короткого замыкания двигателя $M_c > M_{кз}$, ранее широко применяли в грузоподъемных машинах для опускания грузов. В настоящее время его применение нецелесообразно из-за больших потерь электроэнергии.

«Если у ДПТ, работающего в двигательном режиме, на ходу сменить на противоположную полярность напряжения на обмотке якоря, то направление тока якоря I также изменится на противоположное в соответствии с выражением

$$I = -\frac{U + E}{R}. \quad (2.5)$$

Двигатель переводится в тормозной режим. Механические характеристики ДПТ в этом режиме, как можно видеть на рис. 10, располагаются во втором квадранте графика $\omega = f(M)$. Происходит интенсивное торможение, и скорость вращения двигателя падает до нуля. Если в этот момент времени обмотку якоря не отключить от сети, то направление вращения якоря изменится на противоположное, то есть произойдет реверс двигателя. Это накладывает определенные ограничения на применимость данного способа торможения» [1].

«С энергетической точки зрения данный способ неэкономичен, так как большое количество энергии выделяется на добавочном сопротивлении, которое необходимо включать в якорную цепь для ограничения бросков тормозного тока» [1].

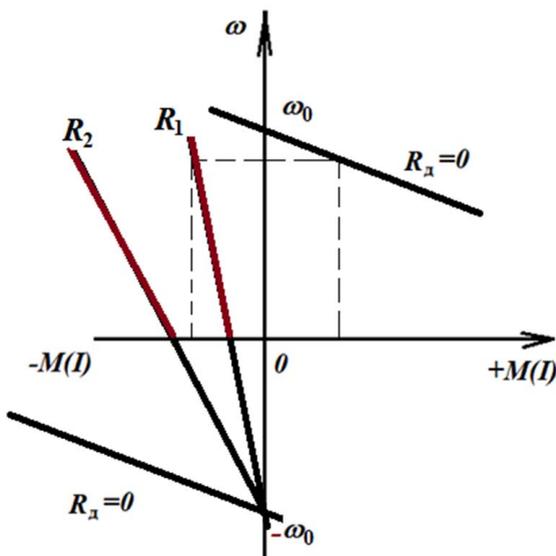


Рис. 10. Механические характеристики ДПТ с НВ в режиме торможения противовключением при $R_1 > R_2$

Описание лабораторного стенда

Описание стенда, используемого для выполнения лабораторной работы 2, представлено в методических указаниях по выполнению лабораторной работы 1.

Программа работы

1. Осуществить рекуперативное торможение двигателя:
 - снять электромеханическую характеристику $\omega = f(I)$ в режиме рекуперативного торможения;
 - построить механическую характеристику $\omega = f(M)$ в режиме рекуперативного торможения. Значение коэффициента c взять из лабораторной работы 1;
 - определить мощность рекуперативного торможения.
2. Осуществить динамическое торможение (величины U и R_1 согласовать с преподавателем):
 - снять электромеханическую характеристику динамического торможения;

– построить механическую характеристику динамического торможения.

3. Выполнить торможение противовключением за счет активной нагрузки на валу (величины U и R_1 согласовать с преподавателем):

– снять электромеханическую характеристику торможения противовключением;

– построить механическую характеристику противовключения.

4. Построить четырехквadrантный график механических характеристик двигателя для всех режимов работы ДПТ: двигательный режим; режим противовключения; режим рекуперативного торможения и динамического торможения.

5. Сделать выводы по работе.

Указания и пояснения по выполнению работы

Проверка работоспособности стенда

Работоспособность стенда проверяется в соответствии с методическими указаниями, изложенными в лабораторной работе 1.

Рекуперативное торможение

1. Произведите реостатный пуск двигателя $M1$ при токе возбуждения $I_{e1} = 1,5$ А по алгоритму, рассмотренному в лабораторной работе 1.

2. Переключите переключатель $R1$ в положение «0» ($R1 = 0$ Ом).

3. Установите потенциометром $R4$ ток возбуждения двигателя $M2$ равным $I_{e2} = 1,5$ А.

4. Включите двигатель $M2$ ($S3$ и $QF3$ – включены). Переключатель $S4$ установите в положение, при котором направления вращения двигателей $M2$ и $M1$ совпадают ($S4$ – в верхнем положении).

5. Установите переключатель $R2$ в положение «0».

6. Уменьшая ток возбуждения I_{e2} потенциометром $R4$, переведите двигатель $M1$ в режим рекуперативного торможения. В режиме рекуперативного торможения с ростом тока I_1 скорость вращения двигателя $M1$ будет увеличиваться. По отношению к режиму двигателя, где ток якоря считается положительным: $I_1 > 0$, в режиме рекуперативного торможения ток якоря изменяет свое направление и становится отрицательным: $I_1 < 0$.

7. Снимите показания амперметра $PA1$ и тахометра. Результаты занесите в табл. 6.

В ходе эксперимента контролируйте, чтобы ток якоря I_2 нагрузочного двигателя $M2$ не превысил значения 15 А ($I_2 < 15\text{ А}$).

Таблица 6

Электромеханическая $\omega = f(I_1)$ и механическая $\omega = f(M)$ характеристики для режима рекуперативного торможения

$R1 = 4,5\text{ Ом}$			$R1 = 3\text{ Ом}$			$R1 = 1,5\text{ Ом}$			$R1 = 0\text{ Ом}$		
ω , рад/с	I_1 , А	M , Н·м	ω , рад/с	I_1 , А	M , Н·м	ω , рад/с	I_1 , А	M , Н·м	ω , рад/с	I_1 , А	M , Н·м

8. Повторите исследование для других положений переключателя $R1$ («3», «6» и «9») и других значений добавочного сопротивления $R1$ (1,5 Ом, 3 Ом и 4,5 Ом).

9. Для расчета тормозного момента ($M = k \cdot \Phi \cdot I = c \cdot I$) используйте значение коэффициента c , полученное в лабораторной работе 1 для тока возбуждения $I_{\sigma 1} = 1,5\text{ А}$.

Динамическое торможение

Эксперимент проводится для четырех значений тормозного сопротивления: $R1 = 0\text{ Ом}$; $R1 = 1,5\text{ Ом}$; $R1 = 3\text{ Ом}$; $R1 = 4,5\text{ Ом}$.

1. Произведите реостатный пуск двигателя $M2$, выставив потенциометром $R4$ ток возбуждения $I_{\sigma 2} = 1,5\text{ А}$ (контроль – по амперметру $PA4$).

2. Включите $S4$ и $S3$.
3. Переведите переключатель $R2$ в положение «10».
4. Включите автомат $QF3$ (двигатель $M2$ начнет вращаться).
5. Плавно переведите $R2$ в положение «0».

6. Для перевода двигателя $M1$ в режим динамического торможения установите потенциометром $R3$ ток возбуждения $I_{\sigma 1} = 1,5 \text{ A}$ (контроль – по амперметру $PA3$).

7. Установите переключатель $R1$ в положение «9».

8. Выключите $S2$ и $QF2$.

9. Замерьте скорость вращения ω и ток якоря I_1 (контроль – по амперметру $PA1$) испытуемого двигателя $M1$ при разных скоростях вращения нагрузочного двигателя $M2$ (5-6 значений). Регулирование скорости вращения двигателя $M2$ производите плавно с помощью переключателя $R2$ и потенциометра $R4$. Данные занесите в табл. 7.

При проведении опытов контролируйте ток якоря I_2 нагрузочного двигателя $M2$, который не должен превысить 15 A ($I_2 < 15 \text{ A}$).

10. Не отключая двигателей $M1$ и $M2$, переведите $R1$ в положение «6». Осуществите аналогичные измерения.

11. Не отключая двигателей $M1$ и $M2$, переведите $R1$ в положение «3». Проведите аналогичные измерения.

12. Не отключая двигателей $M1$ и $M2$, переведите $R1$ в положение «0». Проведите аналогичные измерения.

13. Данные занесите в табл. 7.

14. Изобразите полученные при разных сопротивлениях $R1$ механические характеристики $\omega = f(M)$ на одном графике.

Таблица 7

Электромеханическая $\omega = f(I_1)$ и механическая $\omega = f(M)$ характеристики динамического торможения

$R1 = 4,5 \text{ Ом}$			$R1 = 3 \text{ Ом}$			$R1 = 1,5 \text{ Ом}$			$R1 = 0 \text{ Ом}$		
ω , рад/с	I_1 , А	M , Н · м	ω , рад/с	I_1 , А	M , Н · м	ω , рад/с	I_1 , А	M , Н · м	ω , рад/с	I_1 , А	M , Н · м
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Механические характеристики динамического торможения в зависимости от направления вращения двигателя $M1$ могут быть построены во втором и в четвертом квадрантах.

Торможение противовключением

В данной работе исследуется режим торможения противовключением двигателя $M1$ за счет активного момента сопротивления на валу. В этом режиме токи значительно превышают свои пусковые значения, поэтому эксперименты проводят только при введенном добавочном сопротивлении $R1$.

Для осуществления режима противовключения необходимо выполнить следующие действия:

1. Произвести реостатный пуск двигателя $M1$ при токе возбуждения $I_{e1} = 1,5 \text{ А}$ по алгоритму, рассмотренному в лабораторной работе 1 (контроль – по амперметру $PA3$).

2. Переключатель $R1$ поставить в положение «6», при котором добавочное сопротивление $R1 = 3 \text{ Ом}$.

3. Повернуть потенциометр $R4$ влево до упора, а переключатель $R2$ поставить в положение «10».

4. Переключатель $S4$ поставить в нижнее положение и последовательно включить тумблеры $S3$ и $QF3$.

5. Поворачивая потенциометр $R4$, снять несколько значений тока якоря I_1 (контроль – по амперметру $PA1$) и скорости вращения. Когда ток возбуждения I_{e2} достигнет значения $1,5 \text{ А}$, дальнейшую нагрузку $M1$ осуществлять поворотом рукоятки переключателя $R2$. Данные занести в табл. 8.

6. Не отключая двигателей $M1$ и $M2$, перевести $R1$ в положение «9». Провести аналогичные измерения. Данные занести в табл. 8.

Таблица 8

Электромеханическая $\omega = f(I_1)$ и механическая $\omega = f(M)$ характеристики торможения противовключением

$R1 = 4,5 \text{ Ом}$			$R1 = 3 \text{ Ом}$		
ω , рад/с	I_1 , А	M , Н · м	ω , рад/с	I_1 , А	M , Н · м

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Программа работы.
3. Схемы электропривода.
4. Результаты исследований (таблицы и графики снятых характеристик).
5. Выводы по работе.
6. Список используемых источников.

Контрольные вопросы

1. Назовите способы торможения ДПТ с НВ.
2. Как осуществляется динамическое торможение ДПТ с НВ?
3. В какую сторону вращается якорь ДПТ в режиме рекуперативного торможения?
4. Как осуществляется торможение противовключением за счет активной нагрузки на валу (тормозной спуск)?
5. Как осуществляется режим рекуперативного торможения?
6. От чего зависит величина броска тока при динамическом торможении?
7. Почему при торможении противовключением необходимо в цепь якоря включать большое сопротивление?
8. Постройте механические характеристики ДПТ с НВ в четырех квадрантах.
9. Перечислите достоинства и недостатки известных вам способов торможения ДПТ с НВ?
10. От чего зависит время остановки якоря двигателя при динамическом торможении?

Лабораторная работа 3

Замкнутая система электропривода с вентильным двигателем

Цель работы — исследовать режимы работы и механические характеристики вентильного двигателя при действии обратной связи по скорости вращения.

Указания по выполнению самостоятельной работы

При подготовке к лабораторной работе необходимо по учебникам [1], [2] и конспектам лекций изучить тему «Электроприводы с вентильным двигателем» (устройство, принцип действия, способы регулирования частоты вращения, механические и регулировочные характеристики с разомкнутой и замкнутой системами регулирования).

Краткие теоретические сведения

Структура и характеристики замкнутой системы электропривода с вентильным двигателем

Большинство замкнутых структур электропривода строятся по принципу отклонения, называемому также принципом обратной связи. Основным признаком такой структуры (рис. 11) является наличие цепи обратной связи, по которой информация о текущем значении переменной регулирования подается на вход системы электропривода.

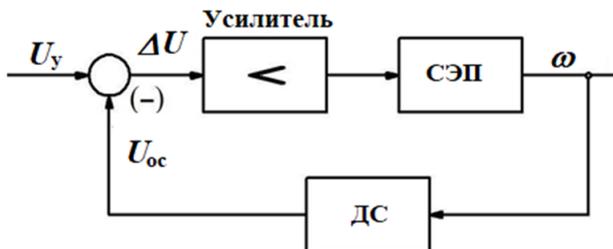


Рис. 11. Структура электропривода с общим усилителем

В приведенной структуре (рис. 11) напряжение обратной связи U_{oc} , снимаемое с выхода датчика скорости ДС, можно записать в виде выражения

$$U_{oc} = K_{oc} \cdot \omega,$$

где K_{oc} – коэффициент передачи датчика скорости (ДС); ω – угловая скорость вращения.

Напряжение U_{oc} вычитается из сигнала задания скорости вращения (напряжения управления) U_y . При этом управление электроприводом осуществляется сигналом отклонения (рассогласования или ошибки) $\Delta U = U_y - U_{oc}$, что позволяет при отклонении скорости вращения от заданного значения автоматически через усилитель и силовую часть электропривода (СЭП) устранять имеющуюся ошибку по скорости.

Замкнутые системы стабилизации скорости «широко применяются в автоматизированном электроприводе, поскольку обеспечивают более широкий диапазон регулирования скорости по сравнению с разомкнутыми системами. В системах стабилизации находят применение различные обратные связи, например положительная по току якоря, отрицательная по напряжению и отрицательная по скорости вращения» [1].

На данном стенде для стабилизации скорости вращения используется отрицательная обратная связь по скорости вращения. В качестве датчика скорости используется тахообмотка Н5–К5, уложенная в пазы статора вентильного двигателя. При вращении ротора в тахообмотке наводится ЭДС, пропорциональная его угловой скорости вращения.

Регулятор скорости

В системе управления вентильным двигателем в качестве общего усилителя используется регулятор скорости. Регулятор скорости своими выходными транзисторами (VT3, VT4, VT9 и VT10) замыкает и размыкает цепи питания датчиков Холла (HG и G) двигателя. При замкнутой цепи датчиков двигатель развивает вращающий момент в соответствии со своей естественной механической характеристикой. При размыкании цепи датчиков Холла двигатель совершает свободный выбег. Суммарный за период коммутации вращающий

момент двигателя определяется соотношением времени замыкания цепи и периода коммутации. Выходные транзисторы регулятора скорости управляются органом сравнения, в котором сравниваются величины напряжения управления и выпрямленного напряжения с тахообмотки двигателя, величина которого пропорциональна его частоте вращения.

При превышении величиной управляющего напряжения величины напряжения с тахообмотки орган сравнения открывает выходной транзистор, что соответствует включению двигателя и увеличению его угловой скорости вращения. Рост частоты вращения происходит до тех пор, пока величина напряжения с тахообмотки не превысит величину управляющего напряжения и орган сравнения не закроет выходной транзистор, при этом двигатель перейдет в режим свободного выбега. Таким образом, частота вращения двигателя стабилизируется на уровне, соответствующем величине управляющего напряжения.

Описание лабораторного стенда

Стенд состоит из приборного блока и электромеханической части, которые соединяются между собой тремя кабелями через разъемы на передней панели стенда. Электромеханическая часть состоит из электродвигателя БК1424 и электромагнитного тормоза, который получает питание от источника постоянного тока. Сопротивление обмотки возбуждения тормоза $R = 80 \text{ Ом}$.

Для контроля нагрузки на валу испытуемого двигателя применяется моментометр. Измерение момента осуществляется в делениях Z по лимбу моментометра. Электромагнитный момент двигателя M измеряется в Н · м. Формула пересчета делений в Н · м имеет вид:

$$M = 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot Z. \quad (3.1)$$

Принципиальная схема стенда представлена на рис. 12.

Перевод обозначений на передней панели стенда:

POWER – энергия;

CONTROLVOLTAGE – управляющее напряжение;

ARMETUREVOLTAG – напряжение якоря (статора);

ARMETURECURRENT – ток якоря (статора);

SPEED, rad/s – скорость, рад/с;
 TESTMOTOR – исследуемый двигатель;
 SUPPLYVOLTAGE – напряжение питания;
 HG – датчик Холла;
 DIGITALTACHOMETER – цифровой тахометр;
 COMPENSATOR – компенсатор;
 CURRENTSOURCE – источник тока;
 BRAKECONTROL – датчик нагрузки;
 BRAKE – электромагнитный тормоз.

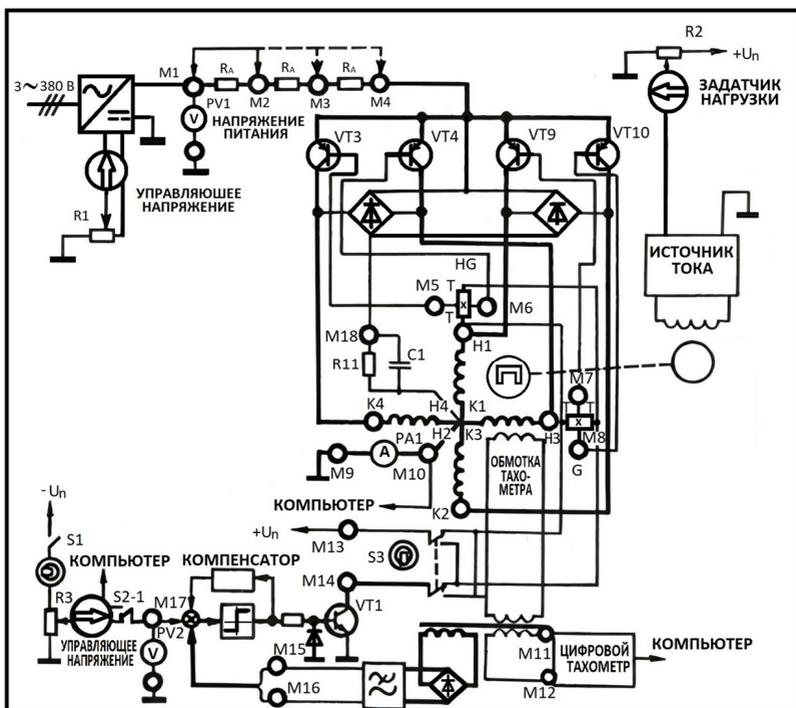


Рис. 12. Принципиальная схема лабораторного стенда

Программа работы

1. Проверить работоспособность стенда.
2. Снять электромеханические характеристики при действии обратной отрицательной связи по скорости.
3. Построить механические характеристики при действии обратной отрицательной связи по скорости.
4. Снять регулировочную характеристику для замкнутой системы электропривода.
5. Снять осциллограммы напряжений на обмотке якоря, осциллограммы сигналов с датчика Холла и тока якоря.

Указания и пояснения по выполнению работы

Проверка работоспособности стенда и подготовка его к работе

Проверка стенда осуществляется в следующем порядке:

1. Перевести тумблеры $S1$ и $S2$ в крайнее левое положение.
2. Повернуть ручки потенциометров $R2$ и $R3$ влево до упора, а потенциометра $R1$ — вправо до упора.
3. Включить автоматический выключатель на левой боковой панели, при этом должна включиться сигнальная лампа **POWER**.
4. Повернуть по часовой стрелке потенциометр $R3$ и убедиться в том, что ротор двигателя приводится во вращение.
5. Зарегистрировать скорость вращения с помощью цифрового тахометра (см. окно «скорость, рад/с»).
6. Переключить тумблер $S3$ и убедиться в том, что ротор вращается.
7. Повернуть по часовой стрелке ручку потенциометра $R2$ и убедиться в том, что электромагнитный тормоз способен создавать нагрузку на валу тестируемого двигателя.
8. Установить ручки потенциометров $R2$, $R3$ и $R1$ и тумблеров $S1$ и $S2$ в исходное положение.

Стенд готов к работе.

**Механические характеристики электропривода
при регулировании скорости в системе с отрицательной
обратной связью по скорости**

Регулирование скорости вращения вентильного двигателя в системе с отрицательной обратной связью по скорости осуществляется путем изменения управляющего напряжения U_y . Поэтому рекомендуется снять характеристики электропривода при различных значениях напряжения управления ($U_y = 3$ В; $U_y = 4$ В; $U_y = 5$ В).

Порядок проведения эксперимента

1. Задайте напряжение управления электроприводом $U_y = 3$ В (контроль – по вольтметру $PV2$), поворачивая ручки потенциометра $R3$ вправо. Запишите в табл. 9 значение тока двигателя I , напряжение на выходе цифрового тахометра $U_{ТР}$ и величину момента нагрузки Z .

2. Потенциометром $R2$ последовательно увеличивайте нагрузку на валу двигателя. Снимите показания тока двигателя I , напряжения на выходе цифрового тахометра $U_{ТР}$ и момента нагрузки Z для 5-6 нагрузочных режимов двигателя. Результаты занесите в табл. 9.

3. Повторите опыт для значений управляющего напряжения $U_y = 4$ В и $U_y = 5$ В. Результаты занесите в табл. 9.

4. Верните ручки потенциометров в исходное положение.

Таблица 9

Электромеханические и механические характеристики
для замкнутой системы электропривода

$U_y = 3$ В					$U_y = 4$ В					$U_y = 5$ В				
$U_{ТР}$ В	ω , с ⁻¹	I , А	Z , дел	M , Н·м	$U_{ТР}$ В	ω , с ⁻¹	I , А	Z , дел	M , Н·м	$U_{ТР}$ В	ω , с ⁻¹	I , А	Z , дел	M , Н·м

**Механические характеристики вентильного двигателя
при регулировании скорости вращения изменением
напряжения статора**

Порядок проведения эксперимента

1. Отключите обратную связь по скорости, повернув ручку потенциометра $R3$ по часовой стрелке до упора. При размыкании отрицательной обратной связи по скорости ротор двигателя будет вращаться с максимальной скоростью (не менее 540 рад/с).

2. Запишите значение напряжения на якоре двигателя U по вольтметру $PV1$.

3. Потенциометром $R2$ последовательно увеличивайте нагрузку на валу двигателя. Снимите показания тока двигателя I , напряжения на выходе цифрового тахометра $U_{\text{ТГ}}$ и момента нагрузки Z для 5-6 нагрузочных режимов двигателя. Результаты занесите в табл. 10.

Внимание: ток якоря двигателя не должен превышать $I \leq 500$ мА (контроль – по амперметру PA).

Таблица 10

Электромеханические и механические характеристики
для разомкнутой системы электропривода

$U =$					$U =$					$U =$				
$U_{\text{ТГ}}$ В	ω , с ⁻¹	I , А	Z , дел	M , Н·м	$U_{\text{ТГ}}$ В	ω , с ⁻¹	I , А	Z , дел	M , Н·м	$U_{\text{ТГ}}$ В	ω , с ⁻¹	I , А	Z , дел	M , Н·м

4. Повторите опыт, уменьшив с помощью потенциометра $R1$ напряжения на якоре на 2 В. Результаты измерений занесите в табл. 10. Еще раз уменьшите напряжение якоря на 2 В. Повторите эксперимент.

5. Верните ручки потенциометров в исходное положение.

Снятие регулировочной характеристики для замкнутой системы

Регулировочная характеристика $\omega = f(U_y)$, представляющая собой зависимость скорости вращения ω от величины управляющего напряжения U_y , снимается в режиме холостого хода электропривода.

Порядок проведения опыта

1. Установите управляющее напряжение $U_y = 0$ В и снимите значение скорости вращения ротора ω .
2. Поворотом потенциометра $R3$ по часовой стрелке задайте напряжение $U_y = 1$ В. Запишите величину скорости вращения ротора ω .
3. Повторите измерения для $U_y = 2$ В, ..., $U_y = 6$ В. Результаты эксперимента занесите в табл. 11.

Таблица 11

Регулировочная характеристика замкнутой системы

U_y , В	0	1	2	3	4	5	6
ω , рад/с							

Снятие осциллограмм

Для изучения особенностей работы замкнутой системы электропривода с вентильным двигателем применяется двухлучевой осциллограф.

Последовательность действий при снятии осциллограмм:

1. Снимите эпюры напряжения на гнездах секций Н1, Н3, К2, К4 для двух значений U_y .
2. Переведите осциллограф в режим измерения переменного тока. Потенциометром $R3$ задайте максимальное значение напряжения управления $U_{y\max}$. Снимите осциллограмму сигнала с датчика Холла HG при вращении вала двигателя в одном направлении.
3. Произведите реверс двигателя с помощью тумблера $S3$. Снимите осциллограмму сигнала с датчика Холла HG при вращении вала двигателя в другом направлении.
4. Снимите осциллограмму тока якоря (гнездо М10).

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Программа работы.
3. Схемы электропривода с вентильным двигателем и обратной отрицательной связью по скорости.
4. Результаты исследований (таблицы, графики механических и регулировочных характеристик для замкнутой и разомкнутой структур электропривода, осциллограммы работы элементов системы электропривода).
5. Выводы по работе.
6. Список используемых источников.

Контрольные вопросы

1. Назначение элементов функциональной схемы системы электропривода с вентильным двигателем и обратной отрицательной связью по скорости.
2. Принцип действия системы электропривода с вентильным двигателем и обратной отрицательной связью по скорости.
3. Механические характеристики электропривода с обратной отрицательной связью по скорости.
4. С какой целью используется обратная отрицательная связь по скорости в системе электропривода?
5. Какие типы датчиков обратной связи применяются в электроприводе?
6. Основное назначение датчика скорости электропривода с вентильным двигателем.
7. Вид регулировочных характеристик вентильного двигателя.
8. Почему вентильный двигатель называют бесконтактным двигателем постоянного тока?
9. Как изменяется жесткость механических характеристик при действии отрицательной обратной связи по частоте вращения ротора?

Лабораторная работа 4

Широтно-импульсное управление двигателем постоянного тока

Цель работы — практическое изучение принципа регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока (ДПТ) с помощью широтно-импульсного преобразователя (ШИП).

Указания по выполнению самостоятельной работы

При подготовке к лабораторной работе необходимо по учебникам [1] и [2], конспектам лекций и кратким теоретическим сведениям лабораторной работы 5 изучить тему «Электроприводы постоянного тока с широтно-импульсным управлением».

Краткие теоретические сведения

Принцип действия системы «Широтно-импульсный преобразователь — двигатель постоянного тока» (ШИП-ДПТ)

Принцип широтно-импульсного управления ДПТ поясняет рис. 13.

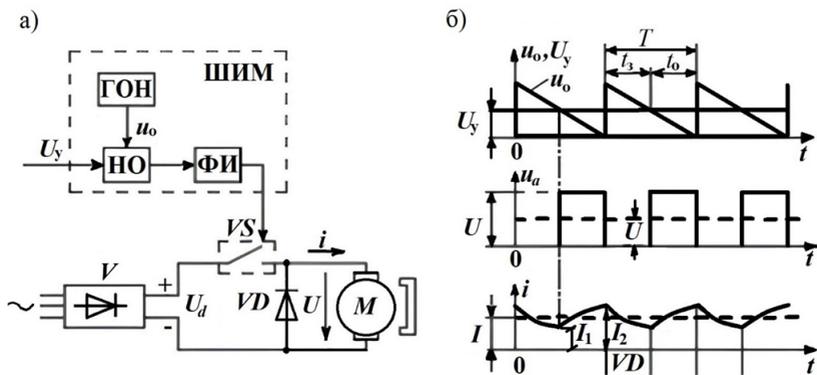


Рис. 13. Схема (а) и диаграмма (б) напряжений и тока при широтно-импульсном управлении

На схеме штриховой линией выделен электронный ключ VS , который периодически подключает цепь якоря двигателя M к выходу неуправляемого выпрямителя V с напряжением U_d . На отрезке времени t_0 , когда ключ VS замкнут (VS открыт), ток якоря двига-

теля i создается напряжением U_d . При этом часть энергии, постав-
ляемой выпрямителем V , запасается в якоре двигателя M в виде
магнитного поля.

На отрезке времени t_3 , когда ключ VS разомкнут (VS закрыт),
ток i якоря двигателя M протекает в прежнем направлении, но через
шунтирующий диод VD , используя для этого энергию электромаг-
нитного поля индуктивностей якорной цепи двигателя M .

Среднее значение напряжения U на якоре двигателя M за период
коммутации T_k ключа VS определяется по формуле

$$U = \frac{1}{T_k} \cdot \int_0^{t_0} U_d dt = \gamma \cdot U_d, \quad (4.1)$$

где $\gamma = \frac{t_0}{T_k}$ — скважность импульсов; U_d — напряжение на выходе вы-
прямителя.

Таким образом, среднее значение напряжения якоря двигателя
 U регулируется путем изменения скважности импульсов. Для изме-
нения скважности импульсов применяется широтно-импульсный
модулятор.

«Широтно-импульсный модулятор (ШИМ), как можно видеть
на рис. 13, состоит из генератора опорного напряжения (ГОН),
нуль-органа сравнения (НО) и формирователя выходных импульсов
(ФИ). ГОН вырабатывает треугольное опорное напряжение u_0 с ча-
стотой $f_k = \frac{1}{T_k}$. Это напряжение сравнивается в НО с управляющим
напряжением U_y . В момент равенства этих напряжений и при ус-
ловии, что $U_y > u_0$, ФИ вырабатывает импульсы, открывающие
 VS . При импульсном управлении ток в якоре двигателя M имеет
колебательный характер. При этом пульсации составляют 2–10 %
от номинального значения тока якоря. Величина пульсаций ΔI
якорного тока определяется выражением

$$\Delta I = \frac{U_d}{R_a} \cdot \frac{\gamma(1-\gamma)}{f_k \cdot T_3}, \quad (4.2)$$

где $T_3 = \frac{L_a}{R_a}$ — электромагнитная постоянная времени якорной цепи
двигателя; R_a и L_a — активное сопротивление и индуктивность якор-
ной цепи двигателя соответственно» [3].

Из уравнения (4.2) видно, что величина пульсаций якорного тока обратно пропорциональна частоте коммутации f_k и электромагнитной постоянной T_{\ominus} , а также зависит от величины скважности импульсов γ . Наибольшие пульсации якорного тока возникают при $\gamma = 0,5$. Для уменьшения пульсаций тока целесообразно увеличивать частоту коммутации ключа f_k . В преобразователях с тиристорными ключами частота коммутации находится в пределах 200–2000 Гц, в преобразователях на транзисторах – 2–40 кГц.

Для обеспечения тормозных режимов при регулировании скорости вращения и сбросе нагрузки используется схема с двумя силовыми ключами (рис. 14, а).

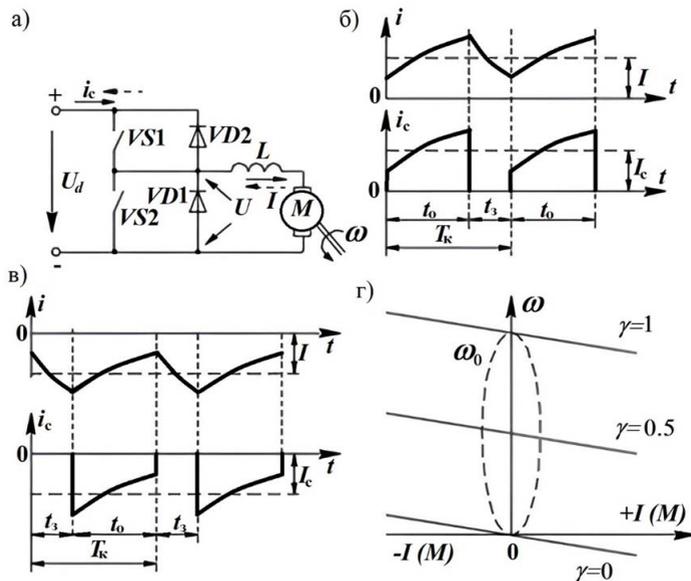


Рис. 14. Схема (а), диаграммы (б и в) работы и механические характеристики электропривода с широтно-импульсным управлением (з)

Если в схеме работают ключ $VS1$ и диод $VD1$, то имеет место двигательный режим работы электропривода (сплошные стрелки). При этом энергия на движение вала потребляется из сети постоянного тока. При работе ключа $VS2$ и диода $VD2$ электропривод переводится в тормозной режим (штриховые стрелки) с рекуперацией энергии движения вала в сеть. Диаграммы тока якоря i и тока питающей сети

i_c соответственно для двигательного и тормозного режимов изображены на рис. 14, б и в. Диаграмма токов показывает, что ток сети i_c носит импульсный характер с изменением направления при тормозном режиме.

Для повышения эффективности торможения, особенно при низких скоростях вращения вала, необходимо увеличить время замыкания ключа $VS2$ и иметь в цепи якоря достаточную суммарную индуктивность.

Механические характеристики электропривода с широтно-импульсным управлением для двухквadrантного режима работы представлены на рис. 14, г. Характеристики не имеют области прерывистых токов, и их жесткость определяется активным сопротивлением якоря двигателя M . Уравнение механических характеристик может быть записано в виде:

$$\omega = \omega_0 \left(\gamma - \frac{I}{I_K} \right) = \omega_0 \left(\gamma - \frac{M}{c \cdot I_K} \right), \quad (4.3)$$

где $\omega_0 = \frac{U}{c}$ – скорость вращения холостого хода; $I_K = \frac{U}{r_a}$ – ток короткого замыкания цепи якоря.

В импульсных преобразователях в качестве электронных ключей применяются силовые транзисторы и транзисторные модули, которые должны надежно работать в широких пределах входного напряжения и тока нагрузки, иметь высокую перегрузочную способность и обеспечивать требуемую частоту коммутации f_k .

Описание лабораторного стенда

Стенд состоит из электромеханического агрегата и приборного блока, соединенных между собой специальным кабелем.

Приборный блок подключается к трехфазной сети 380 В автоматическим выключателем, расположенным в левой боковой панели приборного блока. Электромеханический агрегат состоит из двигателя постоянного тока, синхронного тахогенератора и электромагнитного тормоза с моментомером.

На левой лицевой панели приборного блока (рис. 15) расположены индикаторы и измерительные приборы, а также разъем для подключения электромеханического агрегата.

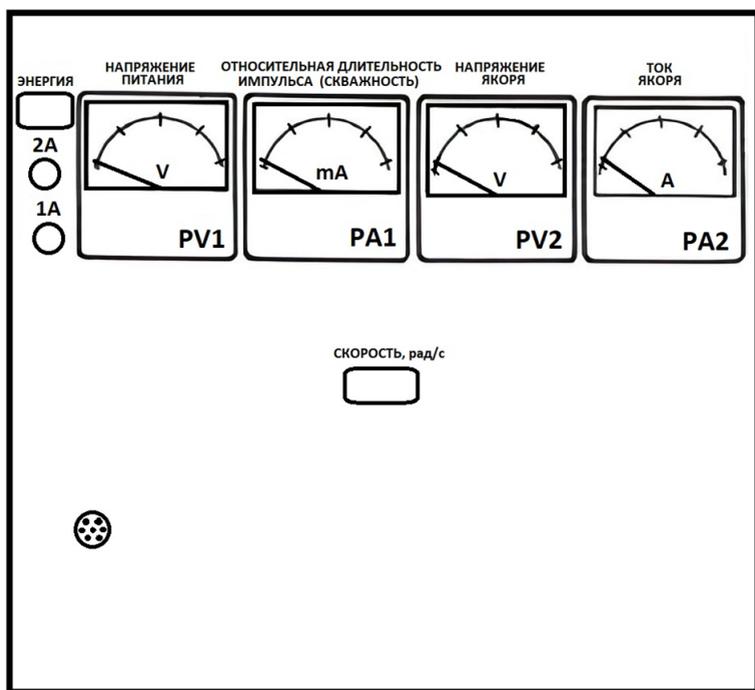


Рис. 15. Левая панель лабораторного стенда

На правой лицевой панели (рис. 16) дана электрическая функциональная схема системы ШИП-ДПТ. Здесь же расположены коммутационные гнезда для изменения системы (размыкание обратной связи, отключение отдельных блоков) и контрольные гнезда (К1–К6, К15, К17–К19, К22–К24), а также тумблеры и потенциометры для ступенчатого и плавного изменения задающих воздействий и коэффициентов передачи корректирующего устройства. Не рекомендуется использовать коммутационные гнезда в качестве контрольных и наоборот.

На рис. 15 и 16 представлен перевод английских обозначений, имеющих в реальности на стенде.

Электромеханический агрегат содержит двигатель постоянного тока Д127 с магнитоэлектрическим возбуждением и электромагнитный тормоз.

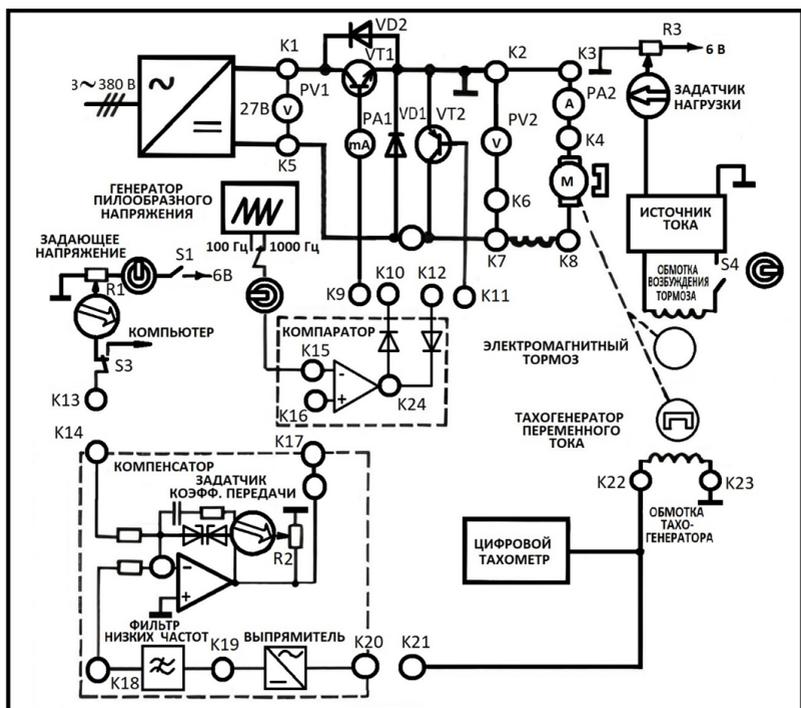


Рис. 16. Правая часть панели лабораторного стенда

Электромагнитный тормоз выполняет роль нагрузочного устройства.

Основные параметры двигателя Д127

Напряжение питания	27 В
Вращающий момент	0,022 Н · м
Сопротивление обмоток якоря при 20 °С	23 Ом
Номинальный ток	0,45 А
Номинальная угловая скорость вращения	230 рад/с
Номинальная частота вращения	2200 об/мин

В составе схемы стенда имеется источник питания, преобразующий трехфазное переменное напряжение в постоянное, равное 27 В. Контроль этого напряжения осуществляется вольтметром PV1. Постоянное напряжение 27 В преобразуется широтно-импульсным преобразователем (ШИП) в импульсное напряжение, которое пода-

ется на якорь двигателя M . Силовая схема ШИП состоит из транзисторов $VT1$ и $VT2$ и диодов $VD1$ и $VD2$.

Сигнал управления U_y подается на широтно-импульсный модулятор (ШИМ), включающий в себя генератор пилообразного напряжения и компаратор. Импульсы с выхода генератора подаются на первый вход компаратора. Частота импульсов может быть выбрана равной 100 или 1000 Гц с помощью тумблера $S2$. На выходе компаратора (ШИМ) формируются прямоугольные импульсы положительной и отрицательной полярности, частота которых определяется частотой генератора, а скважность – величиной сигнала управления U_y . Сигнал с выхода ШИМ через диоды подается на импульсный усилитель мощности (формирователь импульсов), реализованный на транзисторах $VT1$ и $VT2$. Импульс положительной полярности на выходе ШИМ открывает транзистор $VT1$ (транзистор $VT2$ закрыт), при этом напряжение питания U подается на якорь двигателя, ток якоря и скорость вращения ДПТ увеличиваются. Импульс отрицательной полярности с выхода ШИМ открывает транзистор $VT2$ (транзистор $VT1$ закрыт), который обеспечивает динамическое торможение двигателя.

Демпфирующие диоды $VD1$ и $VD2$ служат для отвода тока, возникающего в якоре двигателя под действием ЭДС самоиндукции. Таким образом, рассмотренный ШИП может обеспечить работу как в режиме реверса тока (при использовании транзистора $VT2$), так и без него (переключение режима работы производится путем замыкания (размыкания) коммутационных гнезд $K11$ и $K12$ на передней панели стенда).

Программа работы

1. Проверка работоспособности стенда и подготовка его к работе.

2. Исследование системы ШИП-ДПТ в разомкнутом состоянии:

- экспериментальное исследование регулировочных свойств разомкнутой системы ШИП-ДПТ;
- экспериментальное исследование нагрузочных свойств разомкнутой системы ШИП-ДПТ.

3. Исследование системы ШИП-ДПТ в замкнутом состоянии:
- экспериментальное исследование нагрузочных свойств замкнутой системы ШИП-ДПТ;
 - экспериментальное исследование динамических свойств замкнутой системы ШИП-ДПТ.

Указания и пояснения по выполнению работы

Проверка работоспособности стенда и подготовка его к работе

1. Перед включением стенда убедитесь в следующем:

- ручки потенциометров повернуты против часовой стрелки до упора;
- тумблеры $S1$ и $S4$ разомкнуты, $S2$ переведен в положение 100 Гц;
- установлены перемычки между гнездами $K7$ и $K8$, $K9$ и $K10$, $K11$ и $K12$, $K13$ и $K14$, $K16$ и $K17$, $K20$ и $K21$.

2. Включите автоматический выключатель, который находится на левой боковой панели стенда. Наличие напряжения питания стенда индицируется индикатором POWER.

3. Для проверки работоспособности стенда замкните тумблер $S1$ и, поворачивая ручку потенциометра $R1$, убедитесь, что изменяются скважность импульсов по прибору $PA1$, напряжение на якоре по вольтметру $PV2$ и скорость вращения двигателя по показаниям цифрового тахометра.

4. Замкните тумблер $S4$ и, поворачивая ручку потенциометра $R3$, убедитесь в постоянстве скорости вращения и измерении тока якоря двигателя по амперметру $PA1$.

5. Для возвращения стенда в исходное положение поверните ручки потенциометров против часовой стрелки до упора.

Исследование системы ШИП-ДПТ в разомкнутом состоянии

Экспериментальное исследование регулировочных свойств разомкнутой системы ШИП-ДПТ

1. Разомкните перемычки между гнездами $K13$ и $K14$, $K16$ и $K17$ и замкните перемычки между $K13$ и $K16$.

2. Подключите дополнительный измерительный прибор на вход системы к гнездам $K13$ и «корпус».

3. Подключите осциллограф к выходу компаратора.

4. Поворачивая ручку потенциометра $R1$, проведите замеры: управляющего напряжения на входе системы электропривода U_y , скважности импульсов γ , напряжения на якоре двигателя U и скорости вращения двигателя ω . Скважность импульсов измеряйте по осциллографу, сверяясь с показаниями прибора $PA1$.

5. Результаты измерений занести в табл. 12.
6. Верните потенциометр $R1$ в нулевое положение.
7. Сделайте выводы.

Таблица 12

Регулировочные характеристики системы ШИП-ДПТ

U_y , В					
γ					
U , В					
ω , рад/с					

Экспериментальное исследование нагрузочных свойств разомкнутой системы электропривода ШИП-ДПТ

1. Разомкните перемычки гнезд $K12$ и $K11$, $K7$ и $K8$.
2. Подключите осциллограф к гнездам $K2$ и $K4$ и настройте его, учитывая, что падение напряжения на амперметре $PA2$ весьма мало.
3. Проанализируйте влияние индуктивности якорной цепи ДПТ на форму тока. Для этого запустите систему и снимите осциллограммы тока ДПТ с индуктивностью в цепи якоря и без нее.
4. Разгоните двигатель до какой-либо скорости и резко уменьшите скважность импульсов (поворачивая $R1$ влево). Наблюдайте за поведением вольтметра $PV1$ и амперметра $PA2$. Этот опыт проделайте также с индуктивностью в цепи якоря ДПТ и без нее.
5. Сделайте выводы.
6. Снимите электромеханические характеристики разомкнутой системы ШИП-ДПТ для двух значений скважности импульсов $\gamma = 0,5$ и $\gamma = 1,0$:
– с помощью потенциометра $R1$, ориентируясь по прибору $PA1$, задайте скважность импульсов $\gamma = 0,5$;

- включите тумблер $S4$ и, изменяя величину тока нагрузки потенциометром $R3$, снимите для 5-6 точек показания тока якоря по амперметру $PA2$ и скорости ω по индикатору SPEED;
- результаты измерений занесите в табл. 13;
- повторите опыт для скважности импульсов $\gamma = 1,0$.

Таблица 13

Электромеханические характеристики разомкнутой системы ШИП-ДПТ

$\gamma = 0,5$	$\omega_{cp}, \text{ рад/с}$					
	$I_{cp}, \text{ А}$					
$\gamma = 1,0$	$\omega_{cp}, \text{ рад/с}$					
	$I_{cp}, \text{ А}$					

7. Постройте электромеханические характеристики разомкнутой системы ШИП-ДПТ $\omega = f(I_{cp})$ при $\gamma = 0,5$ и $\gamma = 1,0$.

8. Для каждой из электромеханических характеристик определите перепад скорости $\Delta\omega$ под действием номинальной нагрузки ($I_{cp} = I_{ном}$) относительно скорости холостого хода.

9. Поставьте потенциометры $R1$ и $R3$ в исходное положение.

10. Разомкните тумблеры $S1$ и $S3$.

Исследование системы ШИП-ДПТ в замкнутом состоянии

Экспериментальное исследование нагрузочных свойств замкнутой системы

1. Снимите электромеханические характеристики замкнутой системы ШИП-ДПТ при тех же скоростях холостого хода, что и при исследовании разомкнутой системы:

- разомкните гнезда $K13$ и $K16$, $K7$ и $K8$;
- замкните коммутационные гнезда $K11$ и $K12$, $K13$ и $K14$, $K16$ и $K17$;
- включите тумблер $S1$ и потенциометром $R1$ задайте скорость холостого хода такую же, что и при исследовании разомкнутой системы;
- включите тумблер $S4$ и, изменяя величину тока нагрузки потенциометром $R3$, снимите 5-6 показаний тока якоря по амперметру

$PA2$, скорости ω по индикатору SPEED и скважности γ по $PA1$.

Результаты измерений занесите в табл. 14;

– повторите опыт для другой скорости холостого хода;

– занесите результаты в табл. 14.

2. Постройте электромеханические характеристики замкнутой системы ШИП-ДПТ $\omega = f(I_{cp})$.

3. Для каждой из электромеханических характеристик определите перепад скорости $\Delta\omega$ под действием номинальной нагрузки ($I_{cp} = I_{ном}$) относительно скорости холостого хода.

4. Поставьте потенциометры $R1$ и $R3$ в исходное положение.

5. Разомкните тумблеры $S1$ и $S3$.

6. Сделайте выводы.

Таблица 14

Электромеханические характеристики замкнутой системы ШИП-ДПТ

$\gamma =$	ω_{cp} , рад/с					
	I_{cp} , А					
$\gamma =$	ω_{cp} , рад/с					
	I_{cp} , А					

Экспериментальное исследование динамических свойств замкнутой системы

1. Подключите осциллограф к гнездам K18 и K23.

2. Запустите систему и установите с помощью потенциометра $R1$ скважность $\gamma = 0,5$.

3. Для различных положений потенциометра $R2$ (начиная слева) снимите осциллограммы переходного процесса путем включения тумблера $S1$.

4. Установите потенциометр $R2$ в среднее положение и запустите систему.

5. Наблюдайте на осциллографе, как будет меняться скорость двигателя, если к нему скачком прикладывать нагрузку. Величина нагрузки устанавливается потенциометром $R3$, а подключается тумблером $S4$.

6. Установите потенциометры $R1$ и $R3$ в крайнее левое положение.
7. Выключите тумблеры $S1$ и $S4$, а также автомат на боковой стенке приборного блока.
8. Сделайте выводы.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Программа работы.
3. Схемы электропривода.
4. Регулировочные характеристики, электромеханические характеристики для разомкнутой и замкнутой систем электропривода, осциллограммы сигналов ШИП.
5. Выводы по работе.
6. Список используемых источников.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под скважностью импульсов и как по осциллографу определить скважность?
2. Поясните принцип формирования импульсов с регулируемой скважностью.
3. Какая существует зависимость между скважностью и напряжением на входе ШИП-ДПТ?
4. Какова зависимость между напряжением на якоре и скважностью?
5. Какова зависимость между скоростью вращения двигателя и напряжением на якоре?
6. Почему при введении индуктивности в цепь якоря форма тока изменяется?
7. Почему с ростом нагрузки растет и скважность импульсов?
8. Почему верхняя механическая характеристика имеет перепад скорости такой же, как в разомкнутой системе, а нижняя имеет перепад скорости, равный нулю?
9. Как осуществляется регулирование скорости вращения двигателя в системе ШИП-ДПТ?
10. В какой из исследуемых систем можно получить меньший перепад скорости вращения двигателя под нагрузкой?

Лабораторная работа 5

Асинхронный электропривод с частотным управлением

Цель работы — практическое изучение работы асинхронного электропривода с частотным управлением на базе преобразователя MOVITRAC B.

Указания по выполнению самостоятельной работы

При подготовке к лабораторной работе необходимо по учебникам [1], [2], [3], [4], [5] и конспектам лекций изучить темы «Электроприводы переменного тока», «Частотное управление асинхронными двигателями» и «Транзисторные преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока», а также учебно-методическое пособие «Асинхронный электропривод на базе преобразователя MOVITRAC B».

Краткие теоретические сведения

На рис. 17 представлена принципиальная электрическая схема силовой части электропривода с частотным управлением.

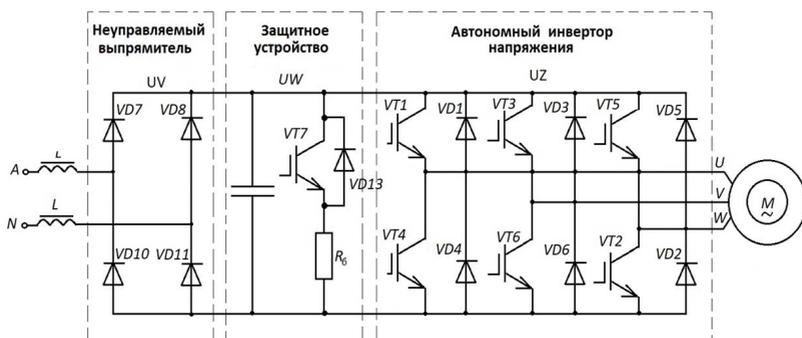


Рис. 17. Силовая схема электропривода с частотным управлением

«В данной схеме силовые транзисторы $VT1–VT6$ осуществляют инвертирование и регулирование амплитуды выходного напряжения путем совмещения этих функций в системе управления преобразователем частоты. Обратный диодный мост $VD1–VD6$ обеспечивает защиту силовых транзисторов от перенапряжений,

а также возврат реактивной энергии двигателя M в накопительный конденсатор C » [5].

«Принцип формирования кривой фазного напряжения u_2 на выходе преобразователя частоты поясняет диаграмма, приведенная на рис. 18. Для обеспечения широтно-импульсного модулирования (ШИМ) схема управления преобразователем вырабатывает двухполярное напряжение треугольной формы u_T , которое затем сравнивается с напряжением управления синусоидальной формы u_y заданной частоты. В моменты равенства названных напряжений схемой вырабатываются импульсы, длительность которых соответствует синусоидальному закону ШИМ. Положительные импульсы поступают на транзистор $VT1$ ($VT3$, $VT5$), а отрицательные — на транзистор $VT4$ ($VT6$, $VT2$). Регулирование амплитуды выходного напряжения производится изменением амплитуды напряжения u_y » [5].

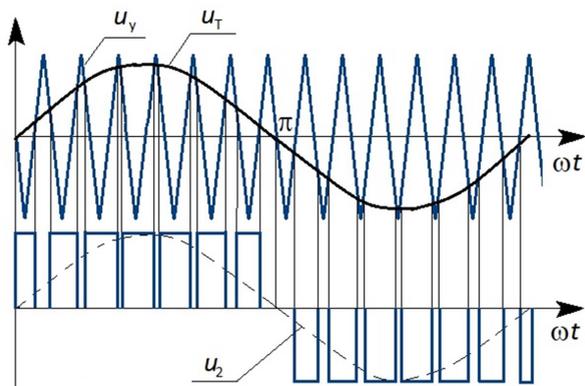


Рис. 18. Диаграмма формирования выходного напряжения преобразователя с ШИМ

Описание лабораторного стенда

На рис. 19 приведена фотография лабораторного стенда для исследования преобразователя частоты типа MOVITRAC В.

Преобразователь частоты типа MOVITRAC В обеспечивает плавное регулирование частоты питающего напряжения в широком диапазоне. Он позволяет точно регулировать скорость и вращающий момент любого стандартного асинхронного электродвигателя

с короткозамкнутым ротором. Функциональные возможности преобразователя частоты:

- ручное и автоматическое управление;
- управление по аналоговому и по цифровому входам;
- диапазон частот – от 0 до 200 Гц;
- диагностика неисправностей преобразователя.

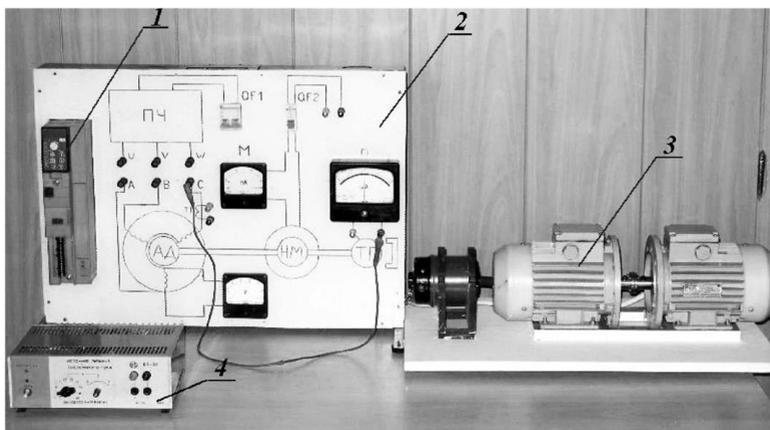


Рис. 19. Внешний вид лабораторного стенда:

- 1 – преобразователь частоты; 2 – mnemonicная панель;
- 3 – электромеханический блок; 4 – регулятор напряжения

Электромеханический блок стенда содержит три электрические машины, находящиеся на одном валу. Исполнительный и нагрузочный двигатели серии АИР-71А2У3 представляют собой асинхронные трехфазные электрические машины с короткозамкнутым ротором. В обозначении серии содержатся следующие сведения: АИ – обозначение серии; Р – привязка мощностей к установочным размерам в соответствии с ГОСТ Р 51689; 71 – высота оси вращения (габарит); А – установочный размер по длине станины; 2 – число полюсов; У – климатическое исполнение (температура окружающей среды $-20...+40$ °С); 3 – категория размещения (эксплуатация в закрытых помещениях без регулирования климатических условий). Для измерения угловой скорости на вал асинхронных двигателей установлен тахогенератор типа СЛ-369.

На рис. 20 представлено изображение лицевой панели преобразователя частоты MOVITRAC B.

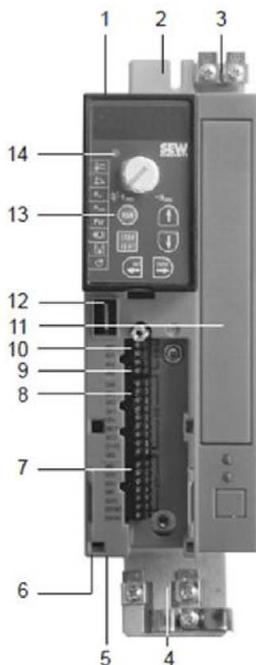


Рис. 20. Лицевая панель преобразователя частоты MOVITRAC B

Основные элементы лицевой панели преобразователя частоты:
1 – разъем подключения к сети; *2* – крепежная пластина; *3* – клемма защитного заземления; *4* – кронштейн клемм для экранов кабелей двигателей над крепежной пластиной; *5* – разъем для двигателя, U/V/W/разъем для тормозного резистора +R/-R; *6* – X17: защитный контакт для цепи безопасного останова; *7* – X13: двоичные выходы; *8* – X12: двоичные входы; *9* – аналоговый вход; *10* – переключатель S11 выбора режима U/I для аналогового входа; *11* – отсек для дополнительного устройства; *12* – разъем для интерфейсного модуля / модуля аналогового ввода-вывода; *13* – клавишная панель; *14* – светодиодный индикатор состояния.

Функциональная схема стенда, изображенная на рис. 21, получает питание от сети напряжением 220 В, частотой 50 Гц. Напряжение подается через автоматический выключатель $QF1$ на преобразователь частоты UM , а также выпрямитель питания обмотки возбуждения тахогенератора BR .

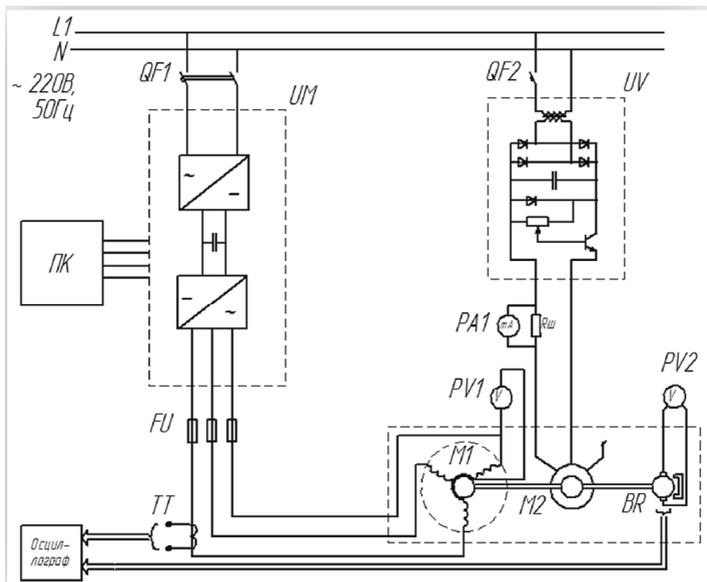


Рис. 21. Функциональная схема лабораторного стенда

Преобразователь частоты UM включает неуправляемый выпрямитель, фильтр, устройство торможения (балластный резистор) и автономный инвертор АИ, который преобразует постоянное напряжение в переменное регулируемой частоты. На выходе преобразователя установлены быстродействующие предохранители $FU1$, $FU2$, $FU3$ для защиты его от токов короткого замыкания. Контроль фазного тока и напряжения исполнительного асинхронного двигателя $M1$ производится через трансформатор тока $ТТ$ и вольтметр $PV1$.

Для обеспечения нагрузки на исполнительный электродвигатель включается регулятор напряжения UV , задается необходимое выходное напряжение, затем включением автоматического выключателя $QF2$ постоянное напряжение подается на две фазы асинхронного

двигателя *M2*, работающего в режиме динамического торможения, через амперметр *PA1*.

Для визуального наблюдения за скоростью вращения предусмотрен вольтметр *PV2*, подключенный к тахогенератору *BR*. При помощи измерительного трансформатора тока ТТ и тахогенератора можно наблюдать форму кривой тока в фазе исполнительного двигателя и изменение скорости. Для этого к соответствующим клеммам подключают осциллограф.

В стенде имеется возможность управления преобразователем частоты с помощью персонального компьютера. В этом случае при помощи адаптера соединяют преобразователь частоты и компьютер между собой. Подключение к компьютеру производится через *USB* с помощью интерфейсного преобразователя. Затем включают компьютер и запускают программу MOVITOOLS MotionStudio.

Программа работы

1. Изучить схему лабораторного стенда.
2. Проверить работоспособность стенда.
3. Снять механическую характеристику электропривода в зоне малых скоростей вращения.
4. Снять механическую характеристику электропривода в зоне высоких скоростей вращения.
5. Определить жесткость механических характеристик и дать их сравнительный анализ.

Указания и пояснения по выполнению работы

Проверка работоспособности стенда

1. Проверьте подключение разъема электромеханического блока к стенду и подключение кабеля питания 220 В.
2. Подключите регулятор напряжения постоянного тока Б5-30 к соответствующим клеммам на передней панели.
3. Включите автоматический выключатель *QF2* и убедитесь, что потенциометр обеспечивает регулирование тока (контроль тока производится миллиамперметром *PA1*).
4. Включите автоматический выключатель *QF1* коммутационной панели. При этом питание подается на обмотку возбуждения тахогенератора и на преобразователь частоты.

5. С помощью клавишной панели оператора преобразователя частоты создайте режим ручного управления 4.

6. Нажмите кнопку *Start* на клавишной панели и задайте угловую скорость вращения асинхронного двигателя. При этом контроль скорости осуществляйте с помощью прибора *PV2*.

***Снятие механической характеристики электропривода
в зоне малых скоростей вращения***

Порядок проведения эксперимента

1. Нажмите кнопку *Start* и с помощью потенциометра клавишной панели осуществите пуск электропривода на заданную скорость вращения (значение угловой скорости задается преподавателем).

2. Включите автоматический выключатель *QF2* и, изменяя ток возбуждения нагрузочного двигателя, создайте нагрузку на валу испытуемого двигателя. Изменение тока производите потенциометром регулятора напряжения *UV* в пределах 0–50 В.

3. Измерьте установившиеся значения скорости прибором *PV1* и ток возбуждения нагрузочного двигателя посредством *PA1*, результаты измерений занесите в табл. 15.

4. После проведения опытов и всех замеров потенциометр регулятора напряжения *UV* возвратите в начальное положение и тумблером выключите прибор.

5. Остановите работу привода нажатием на кнопку *Stop* на панели преобразователя частоты.

Таблица 15

Механические характеристики асинхронного электропривода

Зона малых скоростей			Зона высоких скоростей		
ω , рад/с	I_1 , А	M , Н · м	ω , рад/с	I_1 , А	M , Н · м

Снятие механической характеристики электропривода в зоне высоких скоростей вращения

Последовательность снятия механической характеристики электропривода аналогична рассмотренной выше (значение угловой скорости задается преподавателем).

После проведения опытов и всех замеров выполните следующие действия:

1. Потенциометр регулятора напряжения UV возвратите в начальное положение и тумблером выключите прибор.
2. Включите автоматический выключатель $QF2$.
3. Нажмите кнопку *Stop* на преобразователе частоты.
4. Выключите автоматические выключатели $QF1$.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Программа работы.
3. Функциональная схема электропривода.
4. Схема силовой части электропривода.
5. Механические характеристики электропривода.
6. Выводы по работе.
7. Список используемых источников.

Контрольные вопросы

1. Достоинства и недостатки частотного регулирования скорости вращения.
2. С какой целью при частотном управлении регулируется напряжение, подводимое к статору двигателя?
3. Какие типы преобразователей частоты вам известны?
4. Из каких элементов состоит преобразователь MOVITRAC B?
5. Назовите основные узлы силовой схемы преобразователя частоты.
6. Назовите основные законы скалярного частотного управления.
7. Куда аккумулируется энергия при торможении асинхронного двигателя?
8. Перечислите органы управления на передней панели.
9. Поясните принципы программирования инвертора.
10. Вид механических характеристик асинхронного двигателя при частотах питающего напряжения 50 Гц, 35 Гц и 5 Гц.

Рекомендуемая литература

1. Москаленко, В. В. Электрический привод : учебник / В. В. Москаленко. — Москва : ИНФРА-М, 2019. — 362, [1] с. — (Среднее профессиональное образование). — ISBN 978-5-16-014733-8.
2. Овсянников, Е. М. Электрический привод : учебник / Е. М. Овсянников. — Москва : Форум [и др.], 2019. — 222, [1] с. — (Среднее профессиональное образование). — ISBN 978-5-00091-562-2.
3. Денисов, В. А. Электроприводы переменного тока с частотным управлением : учеб. пособие / В. А. Денисов. — Старый Оскол : ТНТ, 2013. — 163 с. — ISBN 978-5-94178-359-5.
4. Фролов, Ю. М. Регулируемый асинхронный электропривод : учеб. пособие / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. — Изд. 2-е, стер. — Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2022. — 462 с. — ISBN 978-5-8114-2177-0.
5. Электроприводы переменного тока с частотным управлением : лабораторный практикум / Тольяттинский государственный университет ; сост. В. А. Денисов. — Тольятти : Издательство ТГУ, 2012. — 74 с.

***Пример оформления титульного листа отчета
о лабораторной работе***

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.03.02. Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль) / специализация)

**ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПРИНЦИПЫ
РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ
ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Отчет о лабораторной работе 1
по курсу «Электрический привод»

Обучающийся

_____ (И.О. Фамилия)

Группа

_____ (Номер группы)

Преподаватель

_____ (И.О. Фамилия)

Тольятти, 2023

**Пример оформления основных разделов отчета
о лабораторной работе**

Цель работы

Практически изучить электромеханические свойства, механические характеристики и принципы регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

Задачи работы

1. Экспериментально определить ток короткого замыкания двигателя.
2. Экспериментально определить зависимость коэффициента двигателя $c = k \cdot \Phi$ от тока возбуждения I_B .
3. Снять естественную механическую и электромеханическую характеристики для двигательного режима работы ($U = 27$ В).
4. Произвести регулирование угловой скорости двигателя изменением якорного напряжения $U = \text{var}$ и $I_B = \text{const}$.
5. Осуществить регулирование угловой скорости двигателя изменением потока возбуждения.
6. Определить модули жесткости механических характеристик.

Схема электропривода

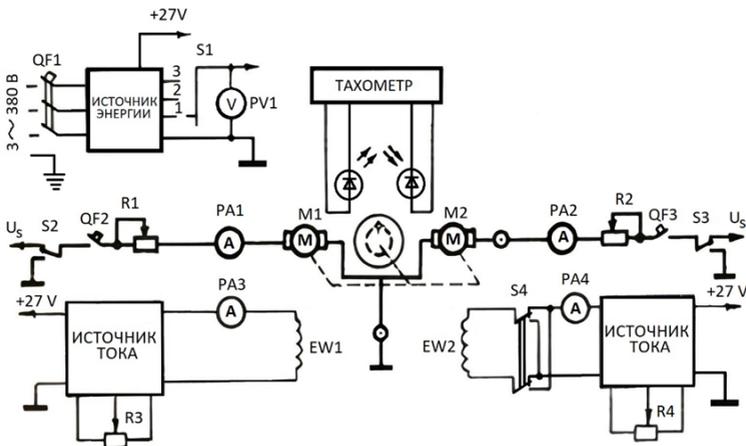


Рисунок 1 – Схема стенда

Результаты исследований

1 Экспериментальное определение тока короткого замыкания двигателя

Результаты измерений тока короткого замыкания представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Ток короткого замыкания двигателя

$R1$	Ом	0	1,5	2,5	3,5
$I_{кз}$	А	27	10,8	8	6

Ток короткого замыкания двигателя равен

$$I_{кз} = I_{пуск} = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_a + R_d}. \quad (1)$$

Следовательно, сопротивление якоря равно

$$R_a = \frac{U}{I_{кз}} - R_d = \frac{27}{6} - 3,5 = 1 \text{ Ом}, \quad (2)$$

где $U = 27 \text{ В}$ – номинальное напряжение якоря.