

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна
Должность: проректор по учебной работе
Дата подписания: 02.02.2022 10:42:33
Уникальный программный ключ:
0b817ca911e6668abb13a5042601e371e11caabb75e9430f4481fda56d089

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра механики, мехатроники и робототехники

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе


О. Г. Локтионова

« 17 » 01



ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ И МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

Методические указания по выполнению лабораторных работ
для студентов направления 15.03.06 Мехатроника и робототехника

Курск 2022

УДК 62.83

Составители: А.В. Мальчиков

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент Е.Н. Политов

Электромеханические и мехатронные системы:
методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Электромеханические и мехатронные системы» для студентов направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А.В. Мальчиков. Курск, 2022. 59 с.

Содержатся сведения по вопросам устройства и работы электроприводов различных типов. Приводятся примеры выполнения лабораторных работ, краткие теоретические положения и контрольные вопросы для защиты.

Предназначены для студентов направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1\16
Усл.печ.л. . Уч.изд.л. 3,1 . Тираж 50 экз. Заказ 392 Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г.Курск, ул.50 лет Октября, 94.

Содержание

Лабораторная работа №1. Исследование работы электропривода на базе коллекторного двигателя постоянного тока	4
Лабораторная работа №2. Исследование работы электропривода на базе асинхронного двигателя.....	15
Лабораторная работа №3. Исследование работы электропривода на базе шагового двигателя.....	24
Лабораторная работа №4. Исследование работы электропривода на базе бесколлекторного двигателя.....	48
Лабораторная работа №5. Исследование работы привода на базе универсального коллекторного электродвигателя.....	49
Библиографический список	59

Лабораторная работа №1.

Исследование работы электропривода на базе коллекторного двигателя постоянного тока

1.1 Цель и задачи работы

Целью работы является освоение студентами принципов построения и функционирования управляемого электропривода на базе двигателя постоянного тока независимого возбуждения

1.2 Задание на лабораторную работу

В рамках настоящей лабораторной работы требуется выполнить следующее:

1. Ознакомиться с конструкцией двигателя постоянного тока
2. Освоить принципы регулирования угловой скорости стэнда
3. Получить зависимости угловой скорости от величины питающего напряжения при различных значениях нагрузки
4. Занести полученные данные в таблицу, построить графики
5. Получить механическую характеристику привода, выполнить ее анализ.

1.3. Краткие теоретические сведения

Электродвигатели постоянного тока применяют в тех электроприводах, где требуется большой диапазон регулирования скорости, большая точность поддержания скорости вращения привода, регулирования скорости вверх от номинальной.

Работа электрического двигателя постоянного тока основана на явлении электромагнитной индукции. Из основ электротехники известно, что на проводник с током, помещенный в магнитное поле, действует сила, определяемая по правилу левой руки:

$$F = BIL,$$

где I — ток, протекающий по проводнику, B — индукция магнитного поля; L — длина проводника.

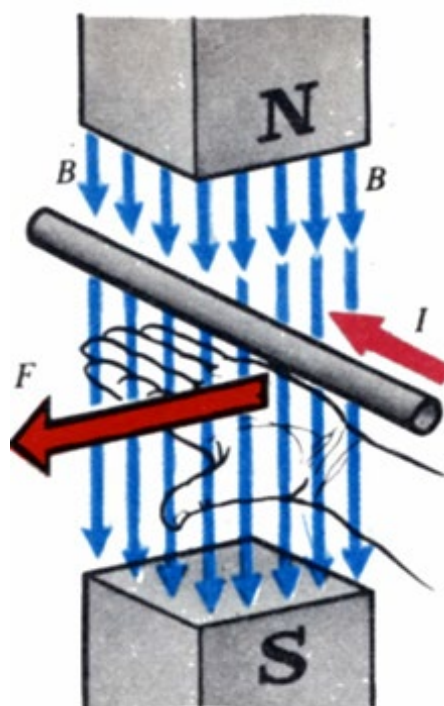


Рис. 1.1 Схема действия сил электромагнитной индукции

При пересечении проводником магнитных силовых линий машины в нем наводится электродвижущая сила, которая по отношению к току в проводнике направлена против него, поэтому она называется обратной или противодействующей (противо-ЭДС). Электрическая мощность в двигателе преобразуется в механическую и частично тратится на нагревание проводника.

Конструктивно все электрические двигатели постоянного тока состоят из индуктора и якоря, разделенных воздушным зазором.

Индуктор электродвигателя постоянного тока служит для создания неподвижного магнитного поля машины и состоит из станины, главных и добавочных полюсов. Станина служит для крепления основных и добавочных полюсов и является элементом магнитной цепи машины. На главных полюсах расположены обмотки возбуждения, предназначенные для создания магнитного поля машины, на добавочных полюсах - специальная обмотка, служащая для улучшения условий коммутации.

Якорь электродвигателя постоянного тока состоит из магнитной системы, собранной из отдельных листов, рабочей

обмотки, уложенной в пазы, и коллектора служащего для подвода к рабочей обмотке постоянного тока.

Коллектор представляет собой цилиндр, насаженный на вал двигателя и избранный из изолированных друг от друга медных пластин. На коллекторе имеются выступы-петушки, к которым припаяны концы секций обмотки якоря. Съём тока с коллектора осуществляется с помощью щеток, обеспечивающих скользящий контакт с коллектором. Щетки закреплены в щеткодержателях, которые удерживают их в определенном положении и обеспечивают необходимое нажатие щетки на поверхность коллектора. Щетки и щеткодержатели закреплены на траверсе, связанной с корпусом электродвигателя.

Коммутация в электродвигателях постоянного тока

В процессе работы электродвигателя постоянного тока щетки, скользя по поверхности вращающегося коллектора, последовательно переходят с одной коллекторной пластины на другую. При этом происходит переключение параллельных секций обмотки якоря и изменение тока в них. Изменение тока происходит в то время, когда виток обмотки замкнут щеткой накоротко. Этот процесс переключения и явления, связанные с ним, называются коммутацией.

В момент коммутации в короткозамкнутой секции обмотки под влиянием собственного магнитного поля наводится э. д. с. самоиндукции. Результирующая ЭДС. вызывает в короткозамкнутой секции дополнительный ток, который создает неравномерное распределение плотности тока на контактной поверхности щеток. Это обстоятельство считается основной причиной искрения коллектора под щеткой. Качество коммутации оценивается по степени искрения под сбегающим краем щетки и определяется по шкале степеней искрения.

Способы возбуждения электродвигателей постоянного тока

Под возбуждением электрических машин понимают создание в них магнитного поля, необходимого для работы

Схемы возбуждения электродвигателей постоянного тока показаны на рисунке 2.

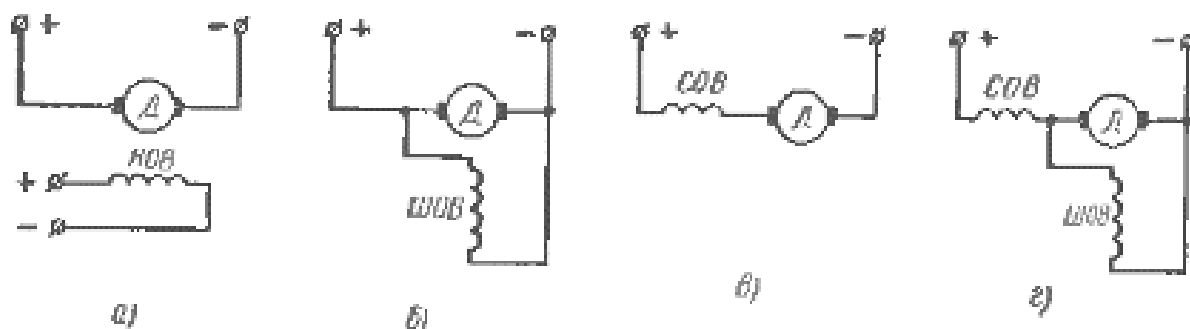


Рис. 1.2. Схемы возбуждения электродвигателей постоянного тока:
 а - независимое, б - параллельное, в - последовательное, г – смешанное

По способу возбуждения электрические двигатели постоянного тока делят на четыре группы:

1. С независимым возбуждением, у которых обмотка возбуждения НОВ питается от постороннего источника постоянного тока.

2. С параллельным возбуждением (шунтовые), у которых обмотка возбуждения ШОВ включается параллельно источнику питания обмотки якоря.

3. С последовательным возбуждением (серийные), у которых обмотка возбуждения СОВ включена последовательно с якорной обмоткой.

4. Двигатели со смешанным возбуждением (компаундные), у которых имеется последовательная СОВ и параллельная ШОВ обмотки возбуждения.

Пуск двигателей постоянного тока

В начальный момент пуска двигателя якорь неподвижен и противо-ЭДС. и напряжение в якоре равна нулю, поэтому $I_{\text{п}} = U / R_{\text{я}}$.

Сопротивление цепи якоря невелико, поэтому пусковой ток превышает в 10 - 20 раз и более номинальный. Это может вызвать значительные электродинамические усилия в обмотке якоря и

чрезмерный ее перегрев, поэтому пуск двигателя производят с помощью пусковых реостатов - активных сопротивлений, включаемых в цепь якоря.

Двигатели мощностью до 1 кВт допускают прямой пуск.

Величина сопротивления пускового реостата выбирается по допустимому пусковому току двигателя. Реостат выполняют ступенчатым для улучшения плавности пуска электродвигателя.

Регулирование частоты вращения электродвигателя постоянного тока

Частота вращения двигателя постоянного тока:

$$n = \frac{U - I_{\text{я}}R_{\text{я}}}{k_c\Phi},$$

где U — напряжение питающей сети; $I_{\text{я}}$ — ток якоря; $R_{\text{я}}$ — сопротивление цепи якоря; k_c — коэффициент, характеризующий магнитную систему; Φ — магнитный поток электродвигателя.

Из формулы видно, что частоту вращения электродвигателя постоянного тока можно регулировать тремя путями: изменением потока возбуждения электродвигателя, изменением подводимого к электродвигателю напряжения и изменением сопротивления в цепи якоря.

Наиболее широкое применение получили первые два способа регулирования, третий способ применяют редко: он неэкономичен, скорость двигателя при этом значительно зависит от колебаний нагрузки. Механические характеристики, которые при этом получаются, показаны на рисунке.

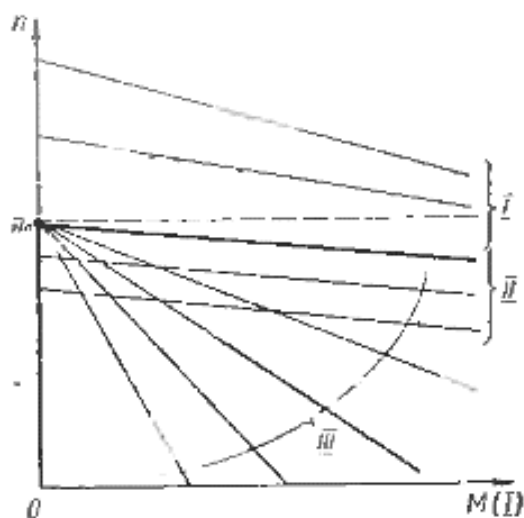


Рис. 1.3. Механические характеристики электродвигателя постоянного тока при различных способах регулирования частоты вращения

Жирная прямая — это естественная зависимость скорости от момента на валу, или, что то же, от тока якоря. Прямая естественной механической характеристики несколько отклоняется от горизонтальной штриховой линии. Это отклонение называют нестабильностью, нежесткостью, иногда статизмом. Группа непараллельных прямых I соответствует регулированию скорости возбуждением, параллельные прямые II получаются в результате изменения напряжения якоря, наконец, веер III — это результат введения в цепь якоря активного сопротивления.

Величину тока возбуждения двигателя постоянного тока можно регулировать с помощью реостата или любого устройства, активное сопротивление которого можно изменять по величине, например транзистора. При увеличении сопротивления в цепи ток возбуждения уменьшается, частота вращения двигателя увеличивается. При ослаблении магнитного потока механические характеристики располагаются выше естественной (т. е. выше характеристики при отсутствии реостата). Повышение частоты вращения двигателя вызывает усиление искрения под щетками. Кроме того, при работе электродвигателя с ослабленным потоком уменьшается устойчивость его работы, особенно при переменных

Способы регулирования подводимой мощности

ШИМ - это широтно-импульсная модуляция. т.е. модуляция (управление) напряжением или током путем изменения ширины импульсов при неизменной их величине.

На экране осциллографа ШИМ сигнал выглядит следующим образом:

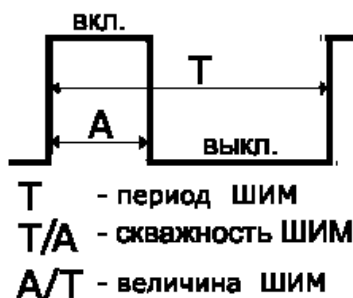


Рис. 1.4. Схема сигнала при широтно-импульсной модуляции

Данный цифровой сигнал имеет 2 состояния - либо включено (на ножке МК это лог. "1"), либо выключено (на ножке МК это лог. "0"). Для создания ШИМ сигнала используются различные ключи – например, встроенные в МК или внешние транзисторы или реле.

ШИМ (англ. PWM) сигнал имеет следующие основные параметры:

- период ШИМ - это время между фронтами (или спадами) соседних импульсов - обозначается Т - обычно он постоянен по времени. С периодом связана обратная величина - частота ШИМ равная $1 / T$ в Гц.

- величина ШИМ - это отношение A / T умноженное на 100 - получаем проценты (англ. X % duty cycle).

- размах ШИМ - это разность между значениями вкл. и выкл. Значение выкл. может быть и ненулевым.

Применение ШИМ позволяет:

1) *регулировать мощность в нагрузке.*

Регулирование мощности осуществляется изменением среднего времени подачи питания в нагрузку. При этом

коммутирующий (включающий - выключающий) нагрузку транзисторный ключ работает в ключевом режиме и поэтому на нем выделяется минимум тепла.

Вот пример регулирования мощности в электродвигателе:

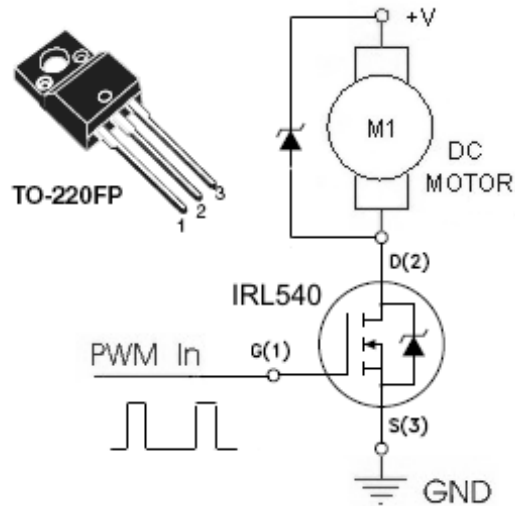


Рис. 1.5. Схема реализации электронного ключа на базе полевого транзистора

Мотор подключается к питанию +V когда напряжение "PWM In". Мощные полевые и IGBT транзисторы правильно переключать с помощью специальных драйверов – например, IRS2110.

Если частота переключений невысокая (до 2-3 КГц), то можно управлять полевыми транзисторами MOSFET серии IRL ножкой МК через резистор 100 Ом, но лучше использовать транзистор IRLZ44 .

Управляя полевым транзистором одной ножкой МК, можно переключать ток 50 -100А. Вместо электродвигателя может быть другой тип нагрузки, например, лампа, нагревательный элемент или смешанная нагрузка - т.е. комбинация R, C и L.

2) ШИМ позволяет выполнить цифро-аналоговое преобразование, т.е. с помощью ШИМ можно выводить аналоговый сигнал. Нужно лишь добавить ФНЧ - фильтр низких частот.

ФНЧ может быть простейшим - к выводу МК, на который выводится ШИМ подключается резистор, а другой вывод резистора

заземляется конденсатором - на этом конденсаторе будет результат ЦА преобразования PWM сигнала. Но лучше использовать более надежный фильтр низких частот – ФНЧ на основе операционных усилителей.

1.4. Описание лабораторного стенда

Внешний вид стенда для исследования работы двигателя постоянного тока показан на рис. 1.6.

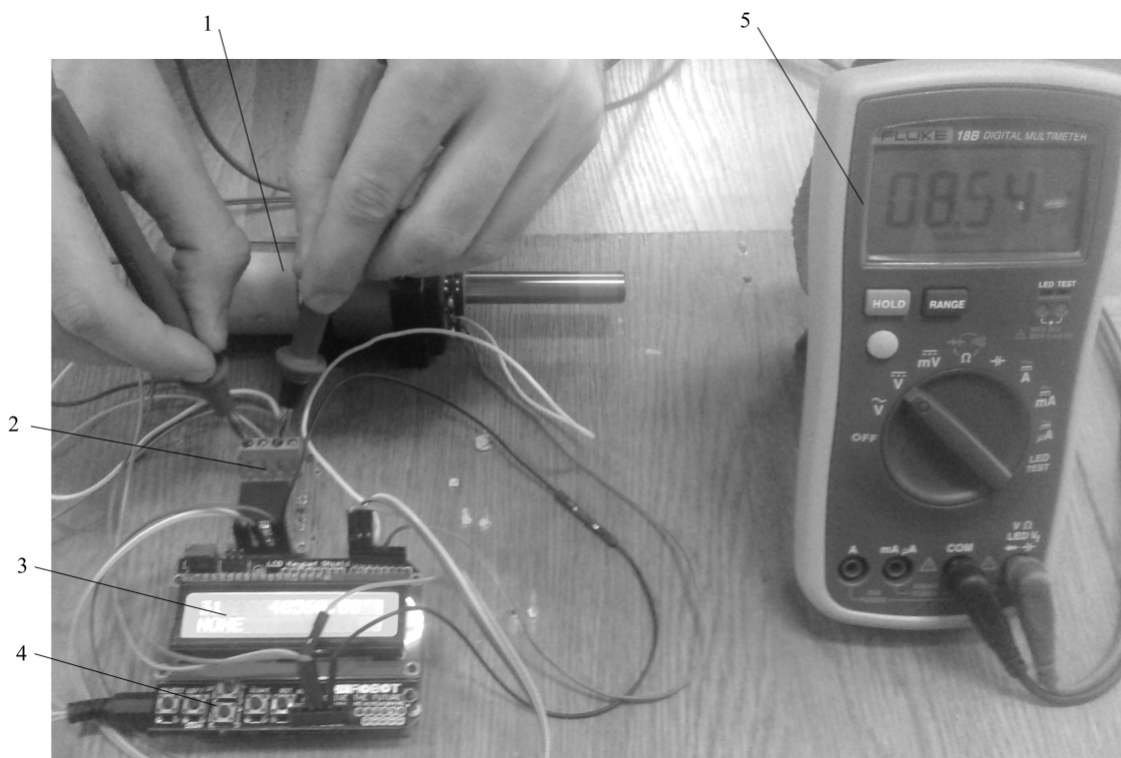


Рис. 1.6. Внешний вид стенда в процессе измерений

На данном фото показаны:

- 1 – электропривод: двигатель постоянного тока независимого возбуждения с планетарным редуктором;
- 2 – драйверная схема – усилитель мощности;
- 3 – микроконтроллер с ЖКИ-дисплеем;
- 4 – клавиатура для ввода параметров вращения вала привода;
- 5 – цифровой мультиметр, для измерения напряжения и тока.

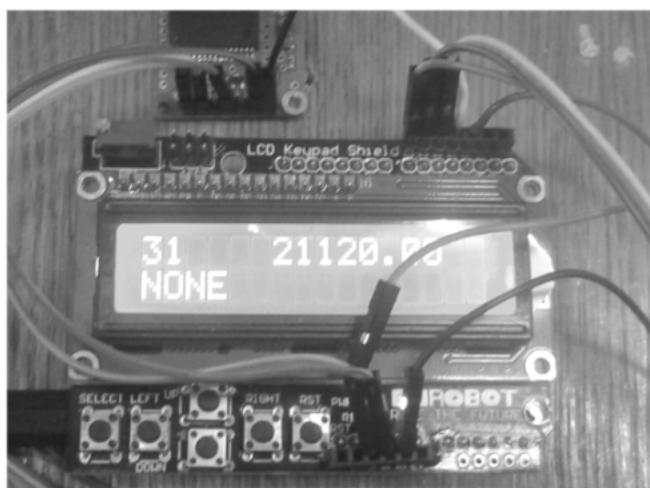


Рис. 1.7. Внешний вид микроконтроллера

На рисунке 1.7 показан внешний вид ЖКИ-дисплея микроконтроллера с отображением значения ШИМ-сигнала в %, значение скорости вращения, индикация нажатия клавиш на клавиатуре.

1.5. Ход работы

1. Подробно изучить краткие теоретические сведения и ход выполнения работы, изложенные в настоящем методическом руководстве.

2. Подключить стенд к источнику питания 12В с соблюдением полярности

3. Задавая параметры вращения вала с помощью клавиатуры выполнить необходимые измерения, занести показания измерительных приборов в таблицу:

Таблица 1.1 – Результаты измерений

Значение ШИМ, %	Напряжения, В	Сила тока, А	Нагрузка. Нм	Частота вращения, об/мин

4. Построить зависимости скорости вращения от напряжения при различных нагрузочных моментах, зависимость скорости вращения от крутящего момента при различных напряжениях питания.

5. Провести анализ полученных результатов, сделать выводы.

1.6. Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип работы коллекторного двигателя постоянного тока?

2. Как выглядит механическая характеристика ДПТ НВ?

3. Какие способы подключения обмоток двигателей ДПТ вы знаете?

4. Опишите способы управления ДПТ НВ.

5. Опишите способы управления ДПТ ПВ.

6. Опишите способы управления ДПТ СВ.

7. Опишите способы торможения ДПТ НВ.

8. Опишите способы торможения ДПТ ПВ

9. Опишите способы торможения ДПТ СВ.

10. В чем заключается преимущества коллекторных ДПТ?

11. В чем заключается недостатки коллекторных ДПТ?

12. Перечислите области применения ДПТ НВ?

Лабораторная работа №2. Исследование работы электропривода на базе асинхронного двигателя

2.1. Цель и задачи и работы

Целью работы является изучение способов внешнего программного управления преобразователем частоты VFD-S через последовательный интерфейс RS-485 для реализации заданного закона регулирования угловой скорости асинхронного двигателя.

2.2. Краткие теоретические сведения

Описание методики программного управления преобразователем частоты (инвертором) VFD-S. Пользователи могут устанавливать параметры и управлять работой преобразователя частоты через последовательный интерфейс RS-485 с помощью промышленного контроллера или компьютера.

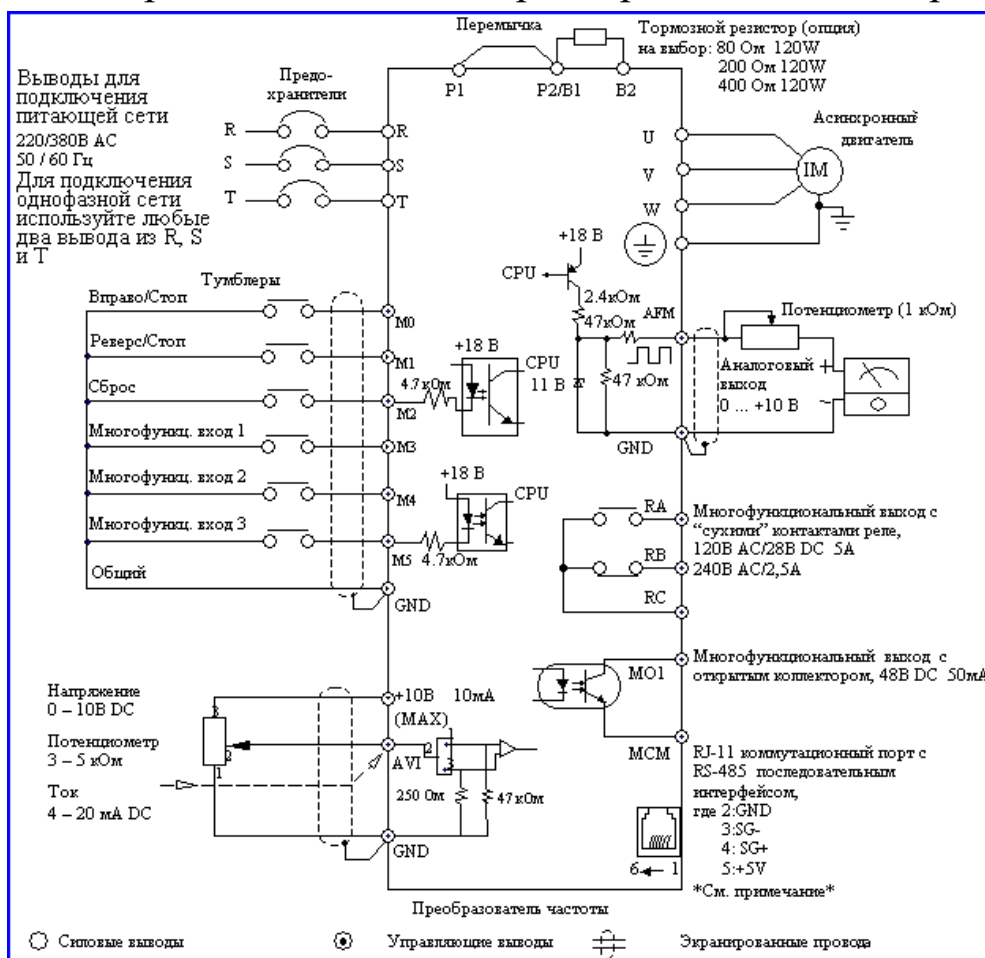


Рис. 2.1. Типовая схема подключения инвертора

На типовой схеме подключения инвертора (рис. 2.1) показаны имеющиеся у инвертора порты и разъемы. Для соединения инвертора с компьютером в нем предусмотрен RJ-11 порт с последовательным RS-485 (USB) интерфейсом (рис. 2.2), расположенный на планке управляющих терминалов.

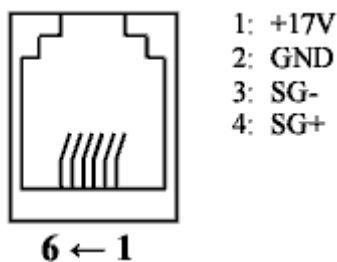


Рис.2.2 Разъем RJ-11

При соединении инвертора с компьютером используется RS232/422/485 USB конвертор (рис. 2.3).

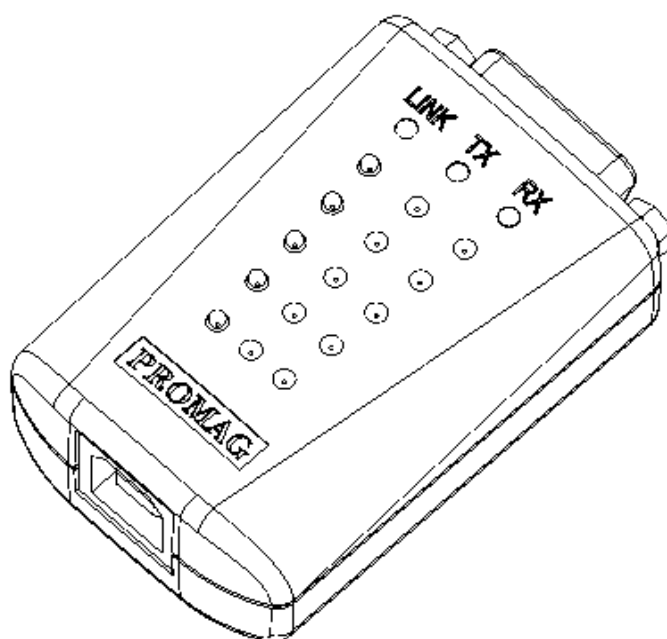


Рис. 2.3. Внешний вид конвертора RS232/422/485 USB

В преобразователе частоты предусмотрена возможность одновременного управления до 254 инверторами от одного компьютера (рис. 4). Для идентификации конкретного преобразователя частоты используется индивидуальный

коммуникационный адрес, который задается параметром Pr.9-00 (табл. 2.1).

Табл. 2.1 Параметры настройки инвертора

9-00	Коммуникационный адрес	Заводская установка: d1
	Диапазон установки: 1...254	Дискретность: 1
	Этот параметр может устанавливаться во время работы привода	

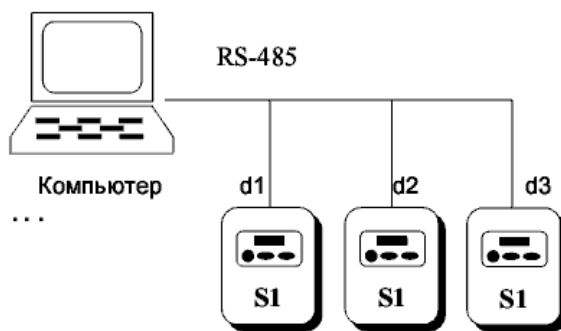


Рис. 2.4. Одновременное управление несколькими инверторами от одного компьютера

Другие основные параметры, необходимые для корректной работы компьютера с инвертором приведены ниже (табл. 2.2, табл. 2.3).

Табл. 2.2 Параметры настройки инвертора

9-01	Скорость передачи данных	Заводская установка: d1
	Возможные значения: d0: 4800 бод; d1: 9600 бод; d2: 19200 бод; D3: 38400 бод.	
	Этот параметр может устанавливаться во время работы привода	

Табл. 2.3 Параметры настройки инвертора

	Протокол коммуникации	Заводская установка: d1
9-04	<p>Возможные значения:</p> <p>d0: Modbus ASCII режим, <7, N, 2>;</p> <p>d1: Modbus ASCII режим, <7, E, 1>;</p> <p>d2: Modbus ASCII режим, <7, 0, 1>;</p> <p>d3: Modbus ASCII режим, <8, N, 2>;</p> <p>d4: Modbus ASCII режим, <8, E, 1>;</p> <p>d5: Modbus ASCII режим, <8, 0, 1>;</p> <p>d6: Modbus RTU режим, <8, N, 2>;</p> <p>d7: Modbus RTU режим, <8, E, 1>;</p> <p>D8: Modbus RTU режим, <8, 0, 1>.</p>	Дискретность: 1
	Этот параметр может устанавливаться во время работы привода	

Управление работой инвертора осуществляется путем посылки ему так называемого «коммуникационного блока данных». Ниже приведен формат данного блока для RTU режима (Табл. 2.4).

Табл. 2.4 Параметры настройки инвертора

START	Интервал молчания – более 10 мс
ADR	Адрес коммуникации: 8-bit адрес
CMD	Код команды: 8-bit команда
DATA(n-1)	Содержание данных nх8 bit данных, n<=25
...	
DATA0	
CRC CHK Low	CRC контрольная сумма: 16-bit контрольная сумма из 2 8-bit символов
CRC CHK High	
END	Интервал молчания – более 10 мс

ADR – коммуникационный адрес, задающийся параметром Pr.9-00 (для трансляции всем инверторам можно указать коммуникационный адрес 0).

CMD – код команды. 03H – команда чтения, 06H – команда записи.

DATA – формат символов данных зависит от командных кодов.

CRC – циклическая проверка на избыточность. Необходима для исключения ситуаций потери и/или искажения данных.

Описание программы управления инвертором. Для внешнего программного управления инвертором используется программа, написанная на языке C++. Интерфейс программы представлен на рис. 2.5.

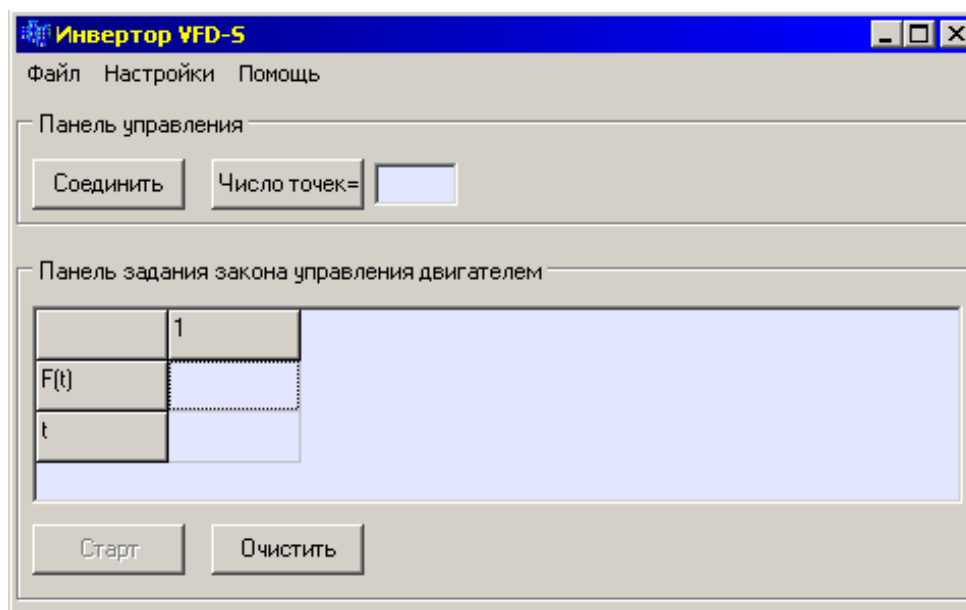


Рис. 2.5. Интерфейс программы управления инвертором

Данная программа соединяется с инвертором в Modbus RTU режиме по протоколу $\langle 8, N, 2 \rangle$ и позволяет задавать закон изменения частоты от времени.

Кнопка «Соединить» служит для инициализации инвертора. Для задания закона управления необходимо ввести число точек, по которым будет происходить генерация управляющей частоты. Сам закон регулирования будет представлять собой двумерный массив точек. t – это время в секундах (задается с точностью до 1 мс), в течение которого будет удерживаться текущая частота $f(t)$. Кнопка «Старт» служит для начала движения двигателя.

2.3. Ход работы

1. Ввести необходимые для внешнего программирования параметры в инвертор посредством его панели управления.

Параметры:

- Pr.0-02 – установить в d10 (возвращение к номинальным настройкам);
- Pr.1-09 – установить в d0.1 (время разгона 0.1 с);
- Pr.1-10 – установить в d0.1 (время замедления 0.1 с);
- Pr.2-00 – установить в d4 (способ задания частоты – по интерфейсу RS-485);

- Pr.2-01 – установить в d3 (управление через последовательный интерфейс RS-485 с возможностью остановки привода кнопкой STOP);

- Pr.8-15 – установить в d1 (запрет на автоматическую регулировку напряжения);

- Pr.9-00 – установить в диапазоне 1...254 (коммуникационный адрес);

- Pr.9-01 – установить в d1 (скорость передачи – 9600 бод);

- Pr.9-04 – установить в d6 (протокол коммуникации - <8, N, 2> Modbus, RTU).

2. Подключить инвертор при помощи RS232/422/485 USB конвертора к компьютеру.

3. Запустить программу управления инвертором. Задать в настройках программы управления инвертором (меню «Настройка») виртуальный СОМ-порт конвертора и коммуникационный адрес инвертора (в качестве коммуникационного адреса можно указать 0). После чего инициализировать инвертор, нажав кнопку «Соединить».

4. Задать необходимое количество точек для задания закона управления и сформировать закон управления, вводя соответствующие значения в таблицу на панели задания закона управления в соответствии с заданным графиком (табл. 5) управления частоты выходного сигнала инвертора.

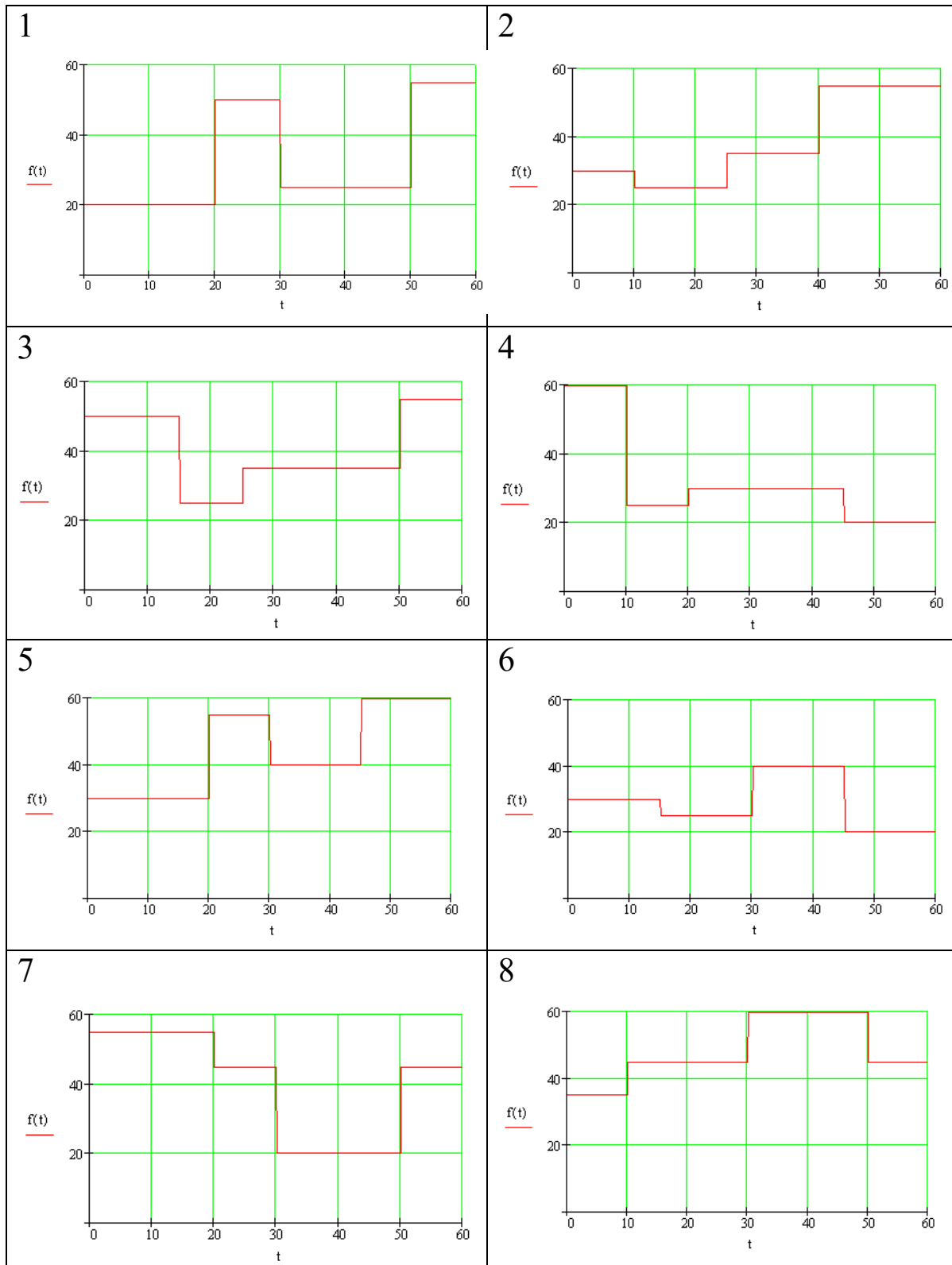
5. Нажать кнопку «Старт» и проследить изменение частоты, генерируемой инвертором и скорости вращения асинхронного двигателя.

6. Проанализировать полученные результаты, написать выводы.

2.4. Варианты заданий

Исходные данные выбираются согласно варианту по табл. 2.5.

Табл. 2.5. Варианты заданий



2.5. Контрольные вопросы

1. В заключается принцип работы асинхронного двигателя переменного тока?
2. Как выглядит механическая характеристика АД?
3. Какие типы АД в зависимости от конструкции ротора вы знаете?
4. Что такое инвертора?
5. Опишите способы управления АД.
6. Опишите способы торможения АД.
7. В чем заключается преимущества АД?
8. В чем заключается недостатки АД?
9. Перечислите области применения АД?

Лабораторная работа №3. Исследование работы электропривода на базе шагового двигателя

3.1 Цель и задачи работы

Целью работы является освоение студентами принципов построения и функционирования управляемого электропривода на базе шагового электродвигателя.

3.2 Задание на лабораторную работу

В рамках настоящей лабораторной работы требуется выполнить следующие:

1. Ознакомиться с конструкцией и принципом работы шагового двигателя.
2. Освоить принципы регулирования угловой скорости станда
3. Изучить характеристики двигателя при различных способах коммутации обмоток (шаговый, волновой, полшаговый, комбинированный).
4. Проанализировать полученные результаты, сделать выводы

3.3 Краткие теоретические сведения

В современных системах управления широко используются устройства, с цифровой обработкой сигналов. Цифровые системы управления привели к созданию нового типа исполнительных механизмов – шаговых двигателей (ШД). В настоящее время промышленностью выпускается множество различных типов шаговых двигателей.

Шаговые двигатели – это электромеханические устройства, преобразующие сигнал управления в угловое (или линейное) перемещение ротора с фиксацией его в заданном положении без устройств обратной связи. Шаговые двигатели относятся к классу бесколлекторных двигателей постоянного тока, которые имеют высокую надежность и большой срок службы, что позволяет использовать их в системах, работающих в тяжелых производственных условиях. Однако, в сравнение с обычными

двигателями постоянного тока, шаговые двигатели требуют значительно более сложных схем управления, которые должны выполнять коммутации обмоток двигателя при работе. Кроме того, сам шаговый двигатель – дорогостоящее устройство, поэтому там, где не требуется точное позиционирование, обычные коллекторные двигатели имеют заметное преимущество. В то же время необходимо отметить, что в последнее время для управления коллекторными двигателями все чаще применяют контроллеры, которые по сложности практически не уступают контроллерам шаговых двигателей.

Одним из главных преимуществ шаговых двигателей является возможность осуществлять точное позиционирование и регулировку скорости без датчика обратной связи. Это очень важно, так как такие датчики могут стоить больше самого двигателя. Однако системы без обратной связи работают при малом ускорении и с относительно постоянной нагрузкой. В то же время системы с обратной связью способны работать с большими ускорениями и даже при переменном характере нагрузки. Если нагрузка шагового двигателя превысит его момент, то информация о положении ротора теряется, и система требует базирования с помощью, например, концевого выключателя или другого датчика. Системы с обратной связью не имеют подобного недостатка.

При проектировании конкретных систем приходится делать выбор между серводвигателем и шаговым двигателем. Когда требуется прецизионное позиционирование и точное управление скоростью, а требуемый момент и скорость не выходят за допустимые пределы, то шаговый двигатель является наиболее экономичным решением.

Как и для обычных двигателей, для повышения момента шагового двигателя может быть использован понижающий редуктор. Решить эту задачу для шаговых двигателей с помощью редуктора не всегда удается. В отличие от коллекторных двигателей, у которых момент растет с увеличением скорости, шаговый двигатель имеет больший момент на низких скоростях. К

тому же, шаговые двигатели имеют гораздо меньшую максимальную скорость по сравнению с коллекторными двигателями, что ограничивает максимальное передаточное число и, соответственно, увеличение момента с помощью редуктора. Поэтому шаговые двигатели с редукторами хотя и выпускаются, но в сравнительно небольшом количестве.

Классификация шаговых двигателей

Современные шаговые двигатели можно разделить по многим признакам, однако, обычно основным признаком, лежащим в основе их классификации, является конструкция.

По конструкции все шаговые двигатели делятся на двигатели с переменным магнитным сопротивлением, двигатели с постоянными магнитами, гибридные шаговые двигатели. Также ШД делятся по количеству и способу коммутации обмоток статора на униполярные и биполярные.

ШД с переменным магнитным сопротивлением

Шаговые двигатели с переменным магнитным сопротивлением имеют несколько полюсов на статоре и ротор зубчатой формы из магнитомягкого материала. Намагниченность ротора отсутствует. Для простоты изложения на рисунке 1 ротор имеет 4 зубца, а статор имеет 6 полюсов. Двигатель имеет 3 независимые обмотки, каждая из которых намотана на двух противоположных полюсах статора. Такой двигатель имеет шаг 30° .

При включении тока в одной из катушек, ротор стремится занять положение, когда магнитный поток замкнут, т.е. зубцы ротора будут находиться напротив тех полюсов, на которых находится запитанная обмотка. Если затем выключить эту обмотку и включить следующую, то ротор поменяет положение, снова замкнув своими зубцами магнитный поток.

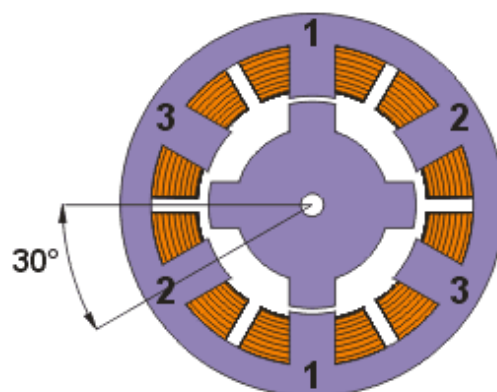


Рис. 3.1. Двигатель с переменным магнитным сопротивлением

Таким образом, чтобы осуществить непрерывное вращение, нужно включать фазы попеременно. Двигатель не чувствителен к направлению тока в обмотках. Реальный двигатель может иметь большее количество полюсов статора и большее количество зубцов ротора, что соответствует большему количеству шагов на оборот. Иногда поверхность каждого полюса статора выполняют зубчатой, что вместе с соответствующими зубцами ротора обеспечивает очень маленькие значения угла шага, порядка нескольких градусов.

Двигатели с переменным магнитным сопротивлением довольно редко используют в промышленных применениях.

ШД с постоянными магнитами

Двигатели с постоянными магнитами состоят из статора, который имеет обмотки, и ротора, содержащего постоянные магниты (рис. 3.2). Чередующиеся полюса ротора имеют прямолинейную форму и расположены параллельно оси двигателя. Благодаря намагниченности ротора в таких двигателях обеспечивается большой магнитный поток и, как следствие, большой момент, чем у двигателей с переменным магнитным сопротивлением.

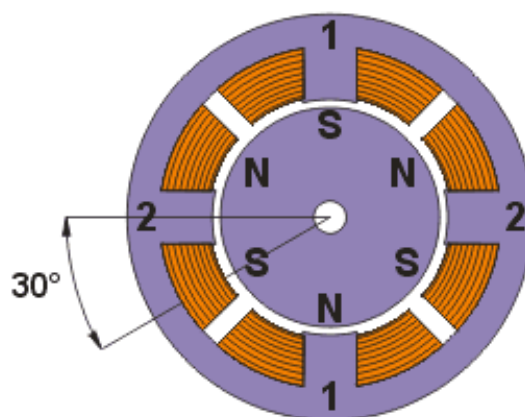


Рис. 3.2. Двигатель с постоянными магнитами

Показанный на рисунке двигатель имеет 3 пары полюсов ротора и 2 пары полюсов статора. Двигатель имеет 2 независимые обмотки, каждая из которых намотана на двух противоположных полюсах статора. Такой двигатель, как и рассмотренный ранее двигатель с переменным магнитным сопротивлением, имеет величину шага 30° . При включении тока в одной из катушек, ротор стремится занять такое положение, когда разноименные полюса ротора и статора находятся друг напротив друга. Для осуществления непрерывного вращения нужно включать фазы попеременно.

Двигатели с постоянными магнитами подвержены влиянию обратной ЭДС со стороны ротора, которая ограничивает максимальную скорость. Для работы на высоких скоростях используются двигатели с переменным магнитным сопротивлением.

Гибридные двигатели

Гибридные двигатели являются более дорогими, чем двигатели с постоянными магнитами, зато они обеспечивают меньшую величину шага, больший момент и большую скорость. Типичное число шагов на оборот для гибридных двигателей составляет от 100 до 400 (угол шага $3.6 - 0.9^\circ$). Гибридные двигатели сочетают в себе преимущество двигателей с переменным магнитным сопротивлением и двигателей с постоянными

магнитами. Ротор гибридного двигателя имеет зубцы, расположенные в осевом направлении.

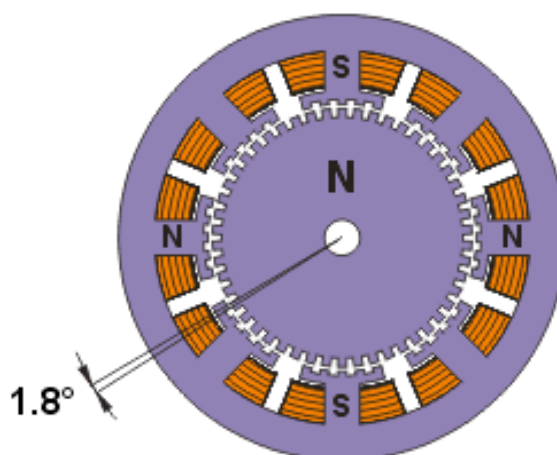


Рис. 3.3. Гибридный ШД

Ротор разделен на две части, между которыми расположен цилиндрический постоянный магнит. Таким образом, зубцы верхней половины ротора являются северными полюсами, а зубцы нижней половины – южными. Кроме того, верхняя и нижняя половины ротора повернуты друг относительно друга на половину угла шага зубцов. Число пар полюсов ротора равно количеству зубцов на одной из его половинок. Зубчатые полюсные наконечники ротора, как и статор, набраны из отдельных пластин для уменьшения потерь на вихревые токи.

Статор гибридного двигателя также имеет зубцы, обеспечивая большое количество эквивалентных полюсов, в отличие от основных полюсов, на которых расположены обмотки. Обычно используются 4 основных полюса для $3,6^\circ$ двигателей и 8 основных полюсов для $1,8^\circ$ и $0,9^\circ$ двигателей. Зубцы ротора обеспечивают меньшее сопротивление магнитной цепи в определенных положениях ротора, что улучшает статический и динамический момент. Это обеспечивается соответствующим расположением зубцов, когда часть зубцов ротора находится строго напротив зубцов статора, а часть между ними. Зависимость между числом полюсов ротора, числом эквивалентных полюсов статора и числом фаз определяет угол шага α двигателя:

$$\alpha = \frac{360}{N_{ph} P_h} = \frac{360}{N},$$

где N_{ph} – число эквивалентных полюсов на фазу = число полюсов ротора, P_h – число фаз, N – полное количество полюсов для всех фаз вместе.

Ротор показанного на рисунке 4 двигателя имеет 100 полюсов (50 пар), двигатель имеет 2 фазы, поэтому полное количество полюсов – 200, а шаг, соответственно, $1,8^\circ$.

Биполярные и униполярные шаговые двигатели

Биполярный двигатель имеет одну обмотку в каждой фазе, которая для изменения направления магнитного поля должна реперолюсовываться драйвером. Для такого типа двигателя требуется мостовой драйвер, или полумостовой с двухполярным питанием. Всего биполярный двигатель имеет две обмотки и, соответственно, четыре вывода (рисунок 3.4, а).

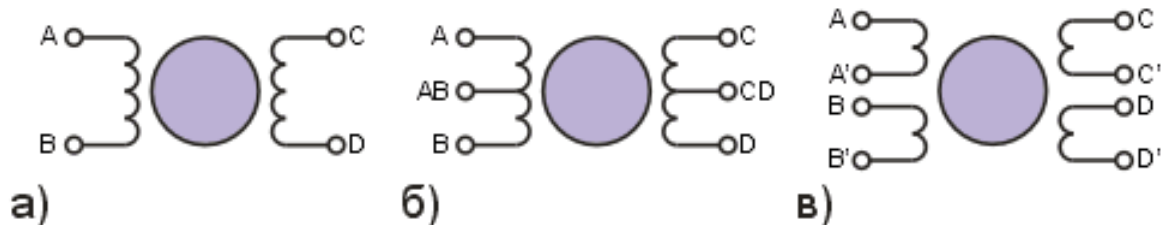


Рис. 3.4 Биполярный двигатель (а), униполярный (б) и четырехобмоточный (в)

Униполярный двигатель также имеет одну обмотку в каждой фазе, но от середины обмотки сделан отвод. Это позволяет изменять направление магнитного поля, создаваемого обмоткой, простым переключением половинок обмотки. При этом существенно упрощается схема драйвера. Драйвер должен иметь только 4 простых ключа. Таким образом, в униполярном двигателе используется другой способ изменения направления магнитного поля.

Средние выводы обмоток могут быть объединены внутри двигателя, поэтому такой двигатель может иметь 5 или 6 выводов

(рисунок 3.4, б). Иногда униполярные двигатели имеют отдельные 4 обмотки, по этой причине их ошибочно называют 4-х фазными двигателями. Каждая обмотка имеет отдельные выводы, поэтому всего выводов 8 (рисунок 3.4, в). При соответствующем соединении обмоток такой двигатель можно использовать как униполярный или как биполярный. Униполярный двигатель с двумя обмотками и отводами тоже можно использовать в биполярном режиме, если отводы оставить неподключенными. В любом случае ток обмоток следует выбирать так, чтобы не превысить максимальной рассеиваемой мощности.

Если сравнивать между собой биполярный и униполярный двигатели, то биполярный имеет более высокую удельную мощность. При одних и тех же размерах биполярные двигатели обеспечивают больший момент.

Момент, создаваемый шаговым двигателем, пропорционален величине магнитного поля, создаваемого обмотками статора. Путь для повышения магнитного поля – это увеличение тока или числа витков обмоток. Естественным ограничением при повышении тока обмоток является опасность насыщения железного сердечника. Однако на практике это ограничение действует редко. Гораздо более существенным является ограничение по нагреву двигателя вследствие омических потерь в обмотках. Как раз этот факт и демонстрирует одно из преимуществ биполярных двигателей. В униполярном двигателе в каждый момент времени используется лишь половина обмоток.

Другая половина просто занимает место в окне сердечника, что вынуждает делать обмотки проводом меньшего диаметра. В то же время в биполярном двигателе всегда работают все обмотки, т.е. их использование оптимально. В таком двигателе сечение отдельных обмоток вдвое больше, а омическое сопротивление – соответственно вдвое меньше. Это позволяет увеличить ток в корень из двух раз при тех же потерях, что дает выигрыш в моменте примерно 40%. Если же повышенного момента не требуется, униполярный двигатель позволяет уменьшить габариты

или просто работать с меньшими потерями. На практике все же чаще применяют униполярные двигатели, так как они требуют значительно более простых схем управления обмотками.

Способы управления шаговым двигателем

Первый способ обеспечивается попеременной коммутацией фаз, при этом они не перекрываются, в один момент времени включена только одна фаза (рис. 3.5, а). Этот способ называют волновой последовательностью “one phase on” full step или wave drive mode. Точки равновесия ротора для каждого шага совпадают с “естественными” точками равновесия ротора у незапитанного двигателя. Недостатком этого способа управления является то, что для биполярного двигателя в один и тот же момент времени используется 50% обмоток, а для униполярного – только 25%. Это означает, что в таком режиме не может быть получен полный момент.

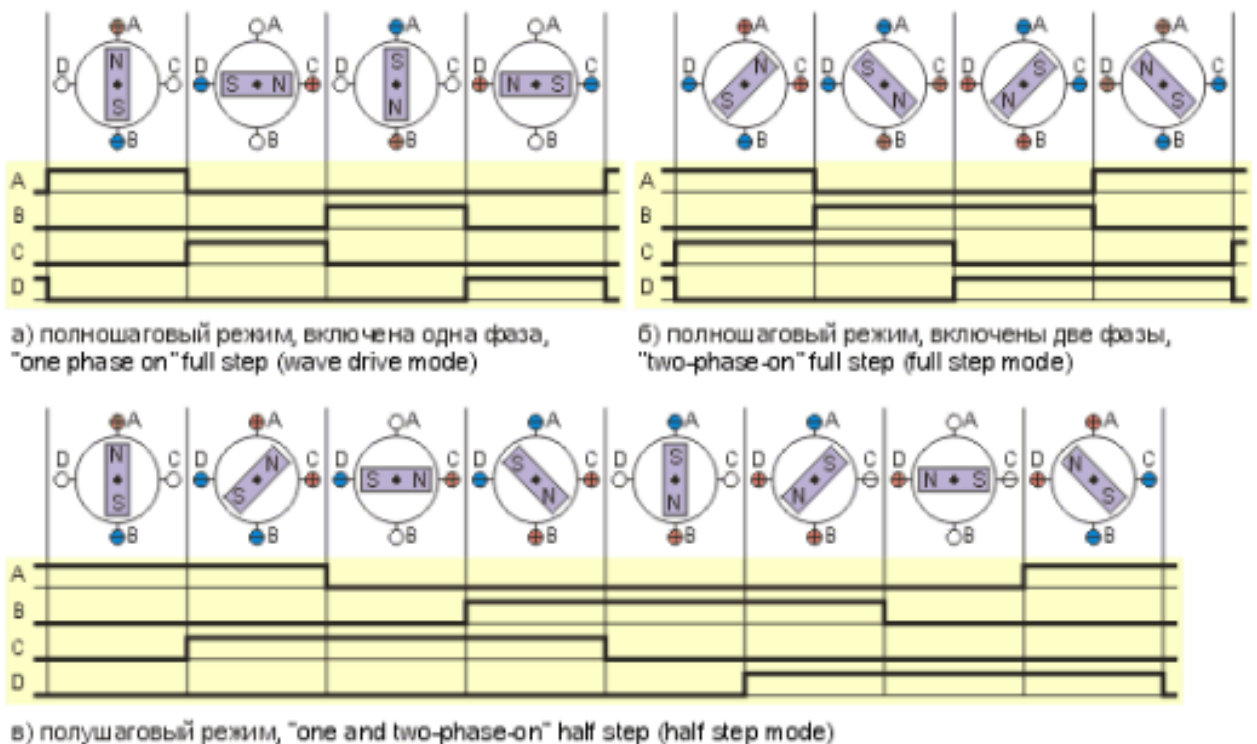


Рис. 3.5. Последовательности коммутации фаз:

а – волновая, б – шаговая, в – полушаговая

Второй способ – управление фазами с перекрытием: две фазы включены в одно и то же время. Его называют шаговой

последовательностью “two-phase-on” full step или просто full step mode. При этом способе управления ротор фиксируется в промежуточных позициях между полюсами статора (рисунок 3.5, б) и обеспечивается примерно на 40% больший момент, чем в случае одной включенной фазы. Этот способ управления обеспечивает такой же угол шага, как и первый способ, но положение точек равновесия ротора смещено на полшага.

В полношаговом режиме с двумя включенными фазами положения точек равновесия ротора смещены на полшага. Нужно отметить, что эти положения ротор принимает при работе двигателя, но положение ротора не может сохраняться неизменным после выключения тока обмоток. Поэтому при включении и выключении питания двигателя ротор будет смещаться на полшага. Для того, чтобы он не смещался при остановке, необходимо подавать в обмотки ток удержания. Ток удержания может быть меньше номинального, так как от двигателя с неподвижным ротором обычно не требуется большого момента. Однако есть применения, когда в остановленном состоянии двигатель должен обеспечивать полный момент, что для шагового двигателя возможно. Это свойство шагового двигателя позволяет в таких ситуациях обходиться без механических тормозных систем. Поскольку современные драйверы позволяют регулировать ток питания обмоток двигателя, задание необходимого тока удержания обычно не представляет проблем. Задача обычно заключается просто в соответствующей программной поддержке для управляющего микроконтроллера.

Полушаговая последовательность – комбинация двух предыдущих, “one and two-phase-on” half step или просто half step mode, когда двигатель делает шаг в половину основного (рисунок 3.5, в).

Этот метод управления достаточно распространен, так как двигатель с меньшим шагом стоит дороже и очень заманчиво получить от 100-шагового двигателя 200 шагов на оборот. Каждый второй шаг запитана лишь одна фаза, а в остальных случаях

запитаны две. В результате угловое перемещение ротора составляет половину угла шага для первых двух способов управления.

Кроме уменьшения размера шага этот способ управления позволяет частично избавиться от явления резонанса. Полушаговый режим обычно не позволяет получить полный момент, хотя наиболее совершенные драйверы реализуют модифицированный полушаговый режим, в котором двигатель обеспечивает практически полный момент, при этом рассеиваемая мощность не превышает номинальной.

По сравнению с волновой и шаговой последовательностями, полушаговая имеет следующие преимущества:

- более высокая разрешающая способность без применения более дорогих двигателей;
- меньшие проблемы с явлением резонанса. Резонанс приводит лишь к частичной потере момента, что обычно не мешает нормальной работе привода.

Недостатком полушагового режима является довольно значительное колебание момента от шага к шагу. В тех положениях ротора, когда запитана одна фаза, момент составляет примерно 70% от полного, когда запитаны две фазы. Эти колебания могут явиться причиной повышенных вибраций и шума, хотя они всё равно остаются меньшими, чем в полношаговом режиме.

Микрошаговый режим обеспечивается путем получения поля статора, вращающегося более плавно, чем в полно- или полушаговых режимах.

В результате обеспечиваются меньшие вибрации и практически бесшумная работа вплоть до нулевой частоты. К тому же меньший угол шага способен обеспечить более точное позиционирование. Существует много различных микрошаговых режимов, с величиной шага от $1/3$ полного шага до $1/32$ и даже меньше. Шаговый двигатель является синхронным электродвигателем. Это значит, что положение равновесия неподвижного ротора совпадает с направлением магнитного поля

статора. При повороте поля статора ротор тоже поворачивается, стремясь занять новое положение равновесия.

Чтобы получить нужное направление магнитного поля, необходимо выбрать не только правильное направление токов в катушках, но и правильное соотношение этих токов.

Результатом использования микрошагового режима является намного более плавное вращение ротора на низких частотах. На частотах в 2 – 3 раза выше собственной резонансной частоты ротора и нагрузки, микрошаговый режим дает незначительные преимущества по сравнению с полу- или полно-шаговыми режимами. Причиной этого является фильтрующее действие инерции ротора и нагрузки. Система с шаговым двигателем работает подобно фильтру нижних частот. В микрошаговом режиме можно осуществлять только разгон и торможение, а основное время работать в полношаговом режиме.

К тому же, для достижения высоких скоростей в микрошаговом режиме требуется очень высокая частота повторения микрошагов, которую не всегда может обеспечить управляющий микроконтроллер. Для предотвращения переходных процессов и потери шагов, переключения режимов работы двигателя (из микрошагового режима в полношаговый и т.п.) необходимо производить в те моменты, когда ротор находится в положении, соответствующем одной включенной фазе.

Во многих приложениях, где требуются малые относительные перемещения и высокая разрешающая способность, микрошаговый режим способен заменить механический редуктор.

Выводы:

Таким образом, к достоинствам шаговых двигателей можно отнести следующие их особенности:

- угол поворота ротора определяется числом импульсов, которые поданы на двигатель;
- двигатель обеспечивает полный момент в режиме остановки (если обмотки запитаны);

- прецизионное позиционирование и повторяемость. Хорошие шаговые двигатели имеют точность от 3 до 5% от величины шага. Эта ошибка не накапливается от шага к шагу;

- возможность быстрого старта/остановки/реверсирования;
- высокая надежность, связанная с отсутствием щеток, срок службы шагового двигателя фактически определяется сроком службы подшипников;

- однозначная зависимость положения от входных импульсов обеспечивает позиционирование без обратной связи;

- возможность получения очень низких скоростей вращения для нагрузки, присоединенной непосредственно к валу двигателя без промежуточного редуктора;

- может быть перекрыт довольно большой диапазон скоростей, скорость пропорциональна частоте входных импульсов;

Недостатки шаговых двигателей:

- шаговым двигателем присуще явление резонанса;
- возможна потеря контроля положения ввиду работы без обратной связи;

- потребление энергии не уменьшается даже без нагрузки;

- затруднена работа на высоких скоростях;

- невысокая удельная мощность;

- относительно сложная схема управления;

3.4. Описание лабораторного стенда

Внешний вид стенда для исследования работы двигателя постоянного тока показан на рис. 3.6.

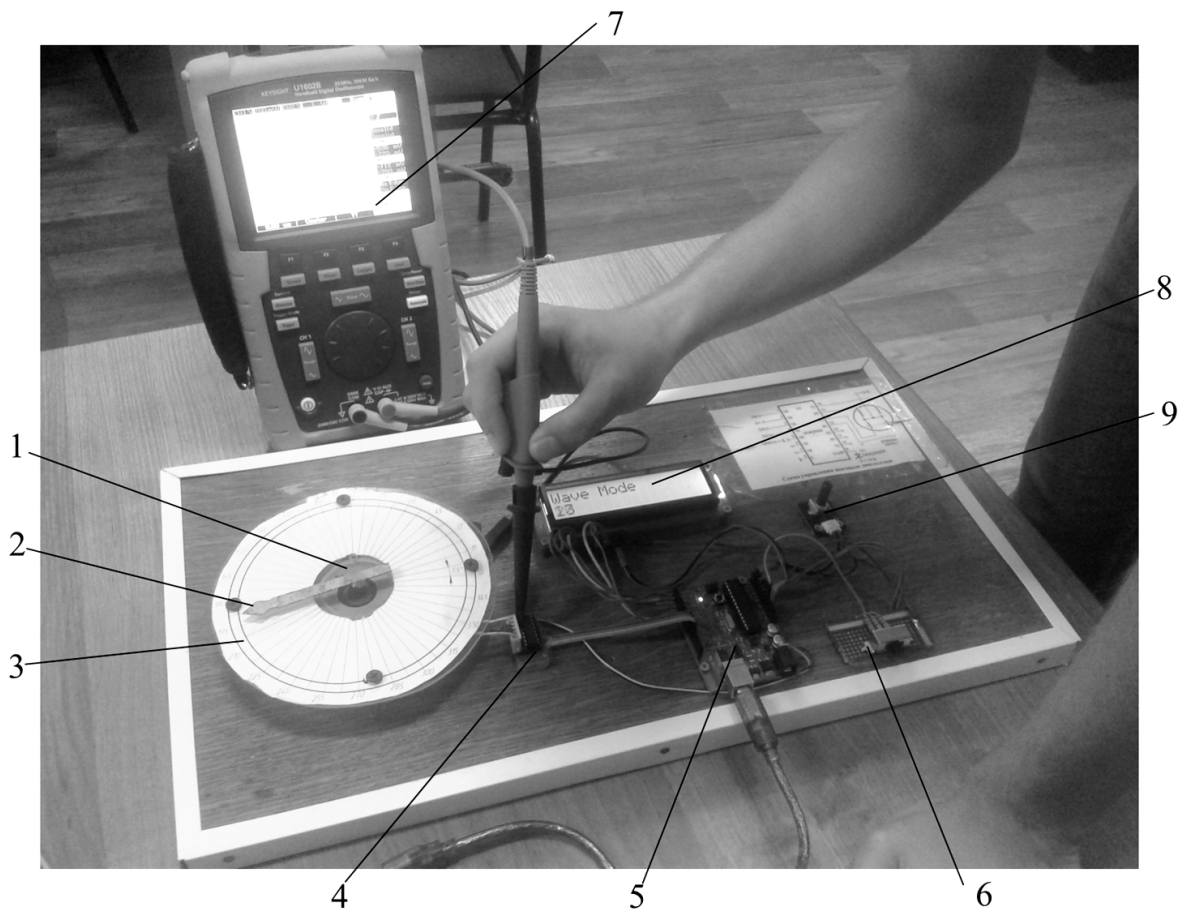


Рис. 3.6. Внешний вид стенда в процессе измерений

На данной фотографии цифрами обозначены следующие компоненты:

- 1 – шаговый двигатель с постоянными магнитами;
- 2 – стрелка, закрепленная на валу двигателя;
- 3 – циферблат, с нанесенной разметкой;
- 4 – драйверная схема шагового двигателя на базе микросхемы L2903;
- 5 – микроконтроллер, осуществляющий коммутацию обмоток;
- 6 – переключатель режимов коммутации обмоток;
- 7 – цифровой осциллограф, для индикации формы сигнала поступающего на ШД;
- 8 – ЖК-дисплей, на который выводится информация о частоте вращения и режиме коммутации обмоток;
- 9 – регулятор частоты вращения двигателя.

3.5. Ход работы

Перед работой со стендом необходимо ознакомиться с теоретическим материалом данных методических указаний, а также источников, приведенных ниже, также необходимо изучить логику работы и схему стенда на основании материалов данных методических указаний, а также описания компонентов, использованных для реализации стенда.

В рамках данного раздела необходимо выполнить следующее:

- 1) Подать питание на стенд
- 2) Увеличить частоту коммутации обмоток. Как изменились управляющие сигналы идущие с МК?
- 3) Уменьшить частоту коммутации обмоток. Как изменились управляющие сигналы идущие с МК?
- 4) Выполнить пункты 2 и 3 для всех режимов коммутации обмоток.
- 9) Оформить отчет о лабораторной работе.

3.6. Контрольные вопросы

1. Что такое шаговый двигатель?
2. Классификация шаговых двигателей.
3. Устройство и принцип действия ШД с переменным магнитным сопротивлением.
4. Устройство и принцип действия ШД с постоянными магнитами.
5. Устройство и принцип действия гибридных ШД.
6. Особенности конструкции, достоинства и недостатки униполярных ШД.
7. Особенности конструкции, достоинства и недостатки биполярных ШД.
8. Способы управления шаговым двигателем
9. Способы практической реализации устройств управления шаговыми двигателями
10. Достоинства и недостатки ШД по сравнению с ДПТ

11. Достоинства и недостатки ШД по сравнению с серводвигателями
12. Влияние сопротивления и индуктивности обмоток ШД на характеристики их работы.
13. Механическая характеристика ШД

Лабораторная работа №4. Исследование работы электропривода на базе бесколлекторного двигателя

4.1. Цель и задачи работы

Целью работы является освоение студентами принципов построения автоматизированного электропривода на базе бесколлекторных двигателей. Освоить принципы работы, конструктивные особенности, и способы управления бесколлекторными двигателями малой мощности.

4.2 Задание на лабораторную работу

В рамках настоящей лабораторной работы требуется выполнить следующие:

1. Ознакомиться с конструкцией и принципом работы бесколлекторного электродвигателя,
2. Освоить принципы регулирования угловой скорости электродвигателя,
3. Освоить принцип РР- модуляции,
4. Осуществить запуск двигателя в асинхронном режиме,
5. С помощью цифрового осциллографа изучить форму сигнала поступающего на обмотки электродвигателя.
6. Проанализировать полученные результаты, сделать выводы.

4.3. Краткие теоретические сведения

Основные технические особенности вентильных двигателей. Под вентильным двигателем понимают синхронный двигатель, содержащий многофазную обмотку статора, ротор с постоянными магнитами и встроенным датчиком положения. Коммутация такого двигателя осуществляется при помощи вентильного преобразователя. Поэтому его принято называть «вентильным».

По сути, вентильный двигатель с точки зрения метода коммутации представляет собой «инвертированный» вариант коллекторной машины постоянного тока. В вентильном двигателе

индуктор находится на роторе, якорная обмотка на статоре. Коммутация осуществляется путем подачи управляющего согласованного воздействия на обмотки статора в зависимости от положения ротора, определяемого с помощью интегрированных в двигатель датчиков обратной связи.

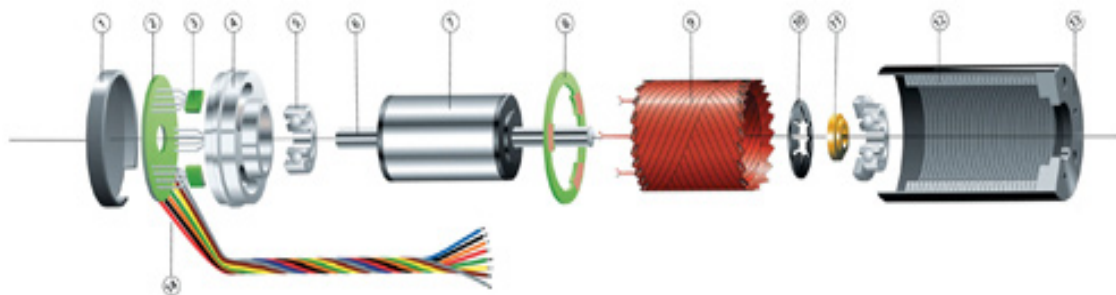


Рис. 4.1. Структура датчиков бесколлекторного двигателя:
 1 – задняя крышка, 2 – печатная плата датчиков, 3 – датчики Холла, 4 – втулка подшипника, 5 – подшипник, 6 – вал, 7 – магниты ротора, 8 – изолирующее кольцо, 9 – обмотка, 10 – тарельчатая пружина, 11 – промежуточная втулка, 12 – изоляция, 13 – корпус, 14 – провода

Рассмотрим структуру вентильного (бесколлекторного двигателя, оснащенного датчиком положения вала) двигателя на примере семейства двигателей Faulhaber (рис. 1). В данном случае в основе ротора лежит двухполюсный магнит, статора трехфазная обмотка, положение ротора определяется с помощью интегрированных в двигатель датчиков Холла. В общем случае ротор может содержать другое количество пар полюсов, а статор иметь более традиционную конструкцию, внешне сходную со статором асинхронной машины.

Наиболее распространен статор с тремя обмотками, соединенными «звездой» (реже в «треугольник») без вывода средней точки. Как известно, именно трехфазная структура является наиболее эффективной при минимуме числа обмоток.

При соединении обмоток «звездой» вентильный двигатель имеет большие постоянные моменты и меньшие постоянные противоЭДС по сравнению с соединением «треугольником».

Поэтому соединение «звездой» используется в приводах, требующих больших крутящих моментов, а соединение «треугольником» – для больших скоростей.

В большинстве случаев обмотки статора выполняются без насыщения, т.е. противо-ЭДС обмоток имеет синусоидальную форму. Такие двигатели зачастую называют AC brushless motor в отличие от DC brushless motor, обмотки статора которого выполняются с насыщением. Такое насыщение в DC brushless motor предназначено для снижения пульсаций тока (и соответственно момента) при применении трапецеидальной коммутации.

Но иногда термин DC brushless motor используют для двигателей с питанием через инвертор от сети постоянного тока, что не совсем корректно.

Обычно количество пар полюсов, определяемое количеством пар магнитов ротора и определяющее соотношение механического и электрического оборотов, равно 4-8.

Статор может быть выполнен с железным (iron core) или безжелезным (ironless) сердечником. Конструкция статора с безжелезным сердечником обеспечивает отсутствие силы притяжения магнитов ротора и железа статорной обмотки (magnetic attraction) и зубцового эффекта (cogging), но снижает незначительно (на 10...20%) эффективность двигателя из-за меньших значений постоянной момента.

Одно из самых очевидных преимуществ ротора с постоянными магнитами состоит в уменьшении диаметра ротора и, как следствие, в уменьшении момента инерции ротора. Технологически магниты могут быть встроены в ротор или расположены на его поверхности. Но пониженный момент инерции зачастую приводит к малым значениям соотношения момента инерции двигателя и приведенного к его валу момента инерции нагрузки (mismatch ratio), усложняющему настройку привода. Поэтому ряд производителей предлагает наряду со стандартным и повышенный – в 2-4 раза – момент инерции ротора.

Датчики положения и дополнительные устройства. В качестве датчика положения, необходимого для коммутации вентильного двигателя, могут быть использованы датчики Холла (цифровые или аналоговые), энкодер (цифровой, аналоговый или абсолютный) или резольвер (вращающийся трансформатор).

Цифровые датчики Холла используются для наиболее распространенной – трапецеидальной коммутации вентильного двигателя. Цифровые датчики Холла могут быть выполнены также и на оптической шкале энкодера. Аналоговые датчики Холла используются для синусоидальной коммутации вентильного двигателя. Энкодер имеет три дифференциальных канала – два канала А, В прямоугольных импульсов, сдвинутых на 90 электрических градусов, и нулевой импульс I (индекс). Резольвер представляет собой вращающийся трансформатор с обмоткой возбуждения и двумя выходными обмотками со сдвигом 90 электрических градусов. Аналоговый энкодер имеет аналоговые sin/cos (1В между пиками реакторек) дифференциальные выходы.

Внешний интерполятор позволяет повысить исходное разрешение с коэффициентом умножения до 4096. Абсолютный энкодер передает информацию по положению по синхронному последовательному интерфейсу (SSI или BiSS), протокол которого задается производителем энкодера. Одними из наиболее популярных протоколов являются Heidenhain EnDat, Tamagawa Smart Abs и Stegman Hiperface протоколы.

Кроме датчика положения дополнительно могут быть встроены: тахогенератор, термодатчик, тормоз или редуктор.

Способы коммутации с применением датчика положения ротора. Способы коммутации вентильного двигателя различаются по типу датчика положения ротора и особенностям регулирования тока в фазах обмоток статора.

Трапецеидальная или шестишаговая (sixstep) коммутация вентильного двигателя осуществляется по цифровым датчикам Холла. Для 3х датчиков Холла, являющихся «грубым» датчиком

положения ротора, возможных состояний на полный электрический оборот будет шесть, каждое из которых соответствует 60 электрическим градусам. При каждом постоянном состоянии датчиков Холла подключаются только две обмотки двигателя, а третья отключена от источника напряжения. Постоянство вектора тока в пределах ± 30 электрических градусов от оптимального (создающего максимальный момент) приводит к 17% пульсациям тока.

Преимущества: готовность к работе при включении питания; дешевый усилитель тока; управление током (моментом) аналоговым сигналом $\pm 10\text{В}$.

Недостатки: пульсации тока; средние показатели быстродействия при позиционировании и равномерности при сканировании.

Область применения: регулирование скорости при невысоких требованиях к эффективности и равномерности перемещения на низких скоростях.

Синусоидальная коммутация лишена недостатков трапецеидальной коммутации за счет непрерывной и плавной коммутации вектора тока. Это достигается благодаря более высокому разрешению датчика положения ротора (обычно инкрементального энкодера) по сравнению с цифровыми датчиками Холла, имеющими разрешение только 60 электрических градусов. Для стандартного двигателя с соединением фаз в «звезду» достаточно контролировать ток в двух обмотках с помощью двух регуляторов на базе ПИрегуляторов. Такой способ коммутации очень эффективен на малых и средних скоростях, но имеет ошибки на высоких скоростях. В этом случае из-за ограниченного усиления ПИрегулятора при заданном напряжении постоянного напряжения (DC bus) максимальная скорость ограничена. Несколько повысить скорость позволяет метод сдвиг фазы (phase advance).

Преимущества: минимальные пульсации тока; высокие показатели быстродействия при позиционировании и равномерности при сканировании.

Недостатки: ограничение мах скорости при заданном напряжении постоянного напряжения; управление током (моментом/силой) при помощи двух аналоговых сигналов $\pm 10\text{В}$.

Область применения: прецизионные механизмы.

Непосредственно векторный контроль тока в координатах DQ использует преобразования между статическими DQ и вращающимися UVW координатами вектора тока, известными как преобразования Парка Кларка. В отличие от синусоидальной такой способ коммутации предполагает работу ПИ регулятора с напряжениями постоянного тока, а не синусоидальными напряжениями. Это и обеспечивает качество управления током, независимое от скорости вращения двигателя.

Векторный контроль предполагает регулирование квадратичной (D) и прямой (Q) составляющих тока. Т.к. только прямая (Q) составляющая тока, перпендикулярная к полю ротора, создает момент двигателя, то задание тока подается на вход прямой (Q) составляющей тока. На вход квадратичной (D) составляющей тока подается «0» сигнал. Преобразования между статическими DQ и вращающимися UVW координатами вектора тока производятся с учетом токов фаз и положения ротора.

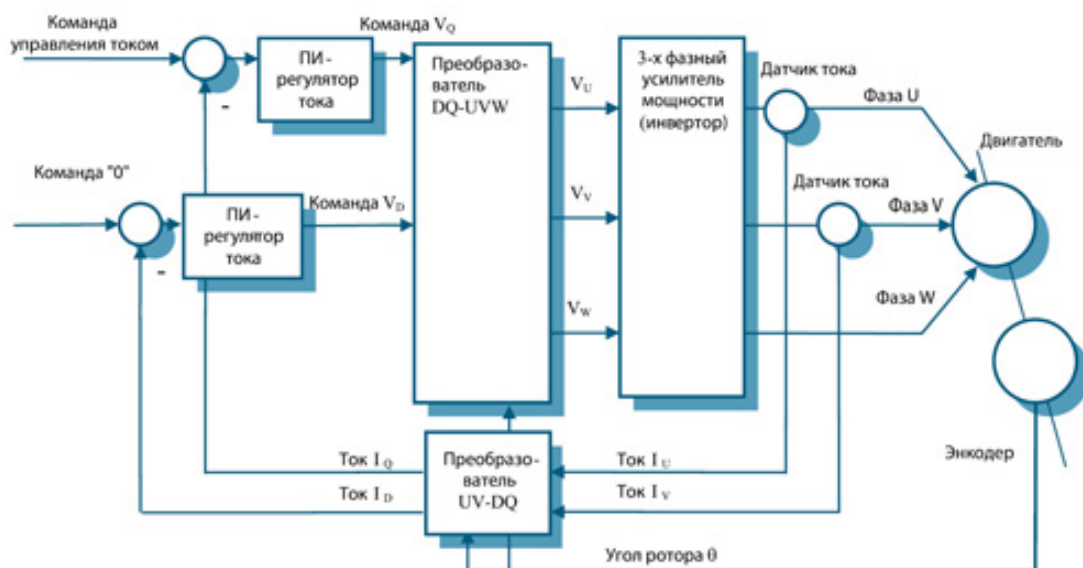


Рис. 4.2 Векторный контроль тока вентильного двигателя

Векторный контроль при наличии преимуществ синусоидальной коммутации позволяет расширить диапазон скоростей вентильного двигателя за счет более полного использования напряжения постоянного тока.

Следует отметить, что для синусоидальной или векторной коммутации тока при использовании инкрементального (относительного) датчика положения ротора необходимо первоначально (т.е. при каждом включении питания) сфазировать положение ротора относительно фаз статора. Алгоритм такой начальной фазировки обычно является «встроенным».

Трапецеидальная коммутация вентильного двигателя не требует начальной фазировки благодаря использованию датчиков Холла, являющихся абсолютными датчиками положения ротора. Поэтому их иногда применяют вместе с инкрементальным датчиком положения для реализации синусоидальной или векторной коммутации тока без необходимости производить начальную фазировку. Такая конфигурация рекомендуется для механизмов, где реализация процедуры начальной фазировки затруднена, например, механизмов вертикального перемещения.

Интегрированное исполнение вентильных двигателей.

Одной из основных перспективных тенденций в развитии современных вентильных двигателей является тяготение производителя к интеграции в единый корпус с двигателем управляющей электроники. Такое решение позволяет предлагать не разрозненный набор комплектующих приводной системы, а законченный привод в сборе. Таким образом, решаются возможные проблемы совместимости различных компонент привода, а также проблема различных интерфейсов компонент приводной системы.

Примером интегрированного привода является серия двигателей VG, предлагаемая компанией Dunkermotoren (рис. 4.3).

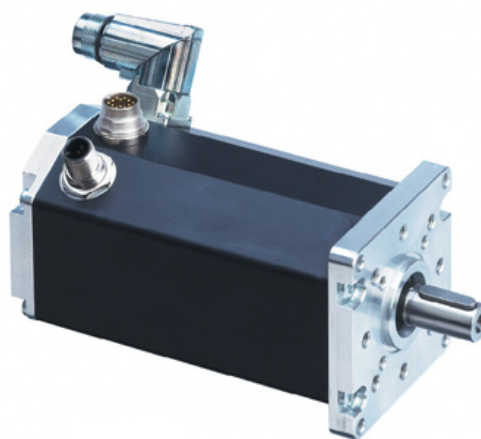


Рис. 4.3 Двигатели Dunkermotoren серии BG

Преимущества использования вентильных двигателей

К несомненным достоинствам вентильных двигателей следует отнести:

- Высокий запасаемый момент
- Работа при высоких пиковых нагрузках
- Хорошее ускорение при изменяющихся нагрузках
- Высокий диапазон скоростей
- Высокую равномерность движения
- Высокую точность позиционирования благодаря возможности использования энкодеров и других датчиков обратной связи по скорости/положению.

4.4. Ход работы

1. Подключить лабораторный стенд к сети постоянного тока;
2. Запустить бесколлекторный двигатель;
3. Замерить частоты вращения, для различных частотах напряжений
4. Выключить питание двигателя
5. Отключить стенд от сети

4.5. Контрольные вопросы

1. Что такое бесколлекторный двигатель?
2. Классификация бесколлекторный двигателей.
3. Устройство и принцип действия БД.

4. Особенности конструкции БД,
5. Достоинства и недостатки БД.
6. Способы управления БД
7. Способы практической реализации устройств управления БД
8. Достоинства и недостатки БД по сравнению с ДПТ НВ
9. Механическая характеристика БД

Лабораторная работа №5. Исследование работы привода на базе универсального коллекторного электродвигателя

5.1 Цель и задачи работы

Цель работы: изучить особенности построения электроприводов на базе универсальных коллекторных двигателей, освоить устройства двигателя, схему подключения, достоинства недостатки УКД, области применения.

5.2. Краткие теоретические сведения

Коллекторные двигатели получили широкое применение не только в электроинструменте (дрели, шуруповёрты, болгарки и т.д), мелких бытовых приборах (миксеры, блендеры, соковыжималки и т.п), но и в стиральных машинах в качестве двигателя привода барабана. Коллекторные моторы более компактные, мощные и простые в управлении. Этим и объясняется их столь массовое применение.

Устройство универсального коллекторного двигателя

Коллекторный двигатель - это однофазный двигатель с последовательным возбуждением обмоток, предназначенный для работы от сети переменного или постоянного тока.

Большинство коллекторных двигателей применяемых в бытовых мехатронных устройствах имеют конструкцию и внешний вид представленный на рисунке 5.1.

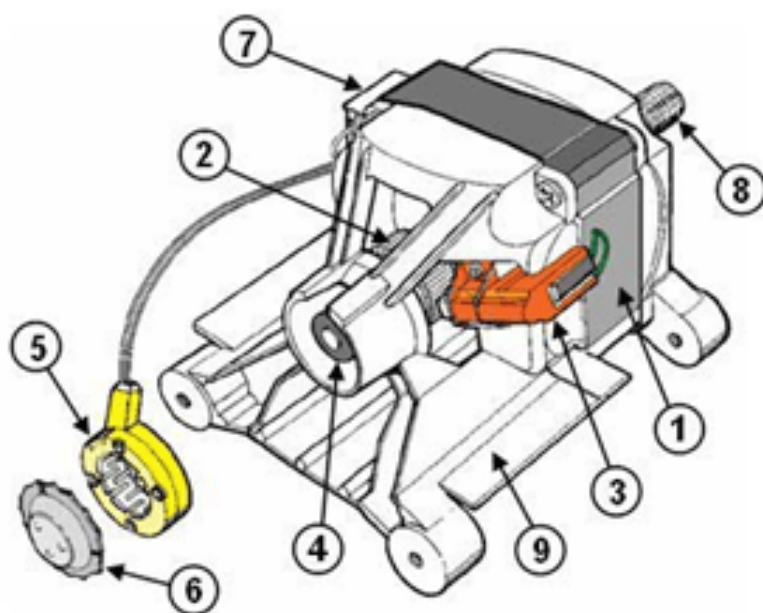


Рис. 5.1 Коллекторный электродвигатель стиральной машины: 1 – статор, 2 – коллектор, 3 – щетка коллекторного узла, 4 – магнитный ротор тахогенератора, 5 – обмотки тахогенератора, 6 – стопорная крышка тахогенератора, 7 – клеммная колодка двигателя, 8 – шкив, 9 – корпус двигателя.

Данный двигатель имеет ряд таких основных частей как: статор (с обмоткой возбуждения), ротор, щетка (скользящий контакт, всегда применяются две щётки), тахогенератор (магнитный ротор которого крепится к торцевой части вала ротора, а катушка тахогенератора фиксируется стопорной крышкой или кольцом). Все составные части скрепляются в единую конструкцию двумя алюминиевыми крышками, которые образуют корпус двигателя. На клеммную колодку выводятся контакты обмоток статора, щёток, тахогенератора необходимые для подключения к электрической схеме. На вал ротора запрессован шкив, через который посредством ременной передачи приводится в движение барабан стиральной машины.

Чтобы в дальнейшем лучше понять как работает коллекторный двигатель, давайте рассмотрим устройство каждого из его основных узлов.

Ротор УКД

Конструкция ротора УКД показана на рис. 5.2

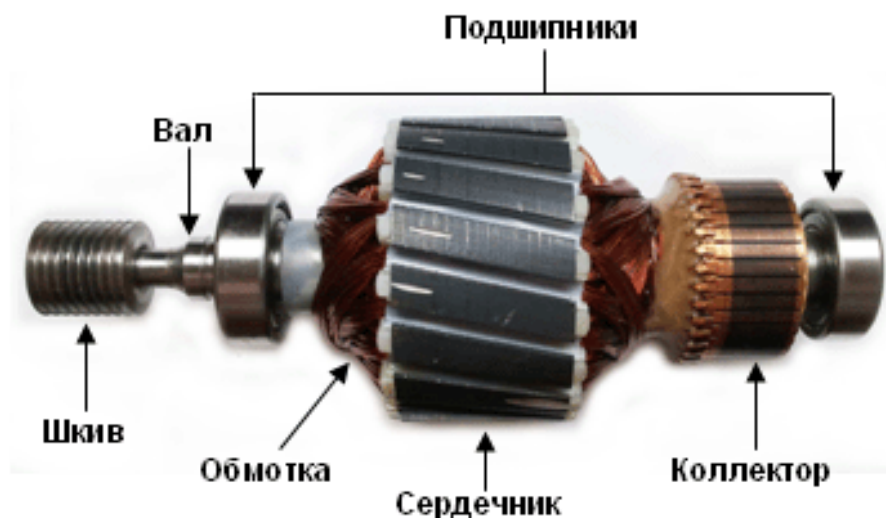


Рис.5.2 Ротор (якорь) коллекторного двигателя

Ротор (якорь) - вращающаяся (подвижная) часть двигателя (Рис. 5.2). На стальной вал устанавливается сердечник, который для уменьшения вихревых токов изготавливают из наборных пластин электротехнической стали. В пазы сердечника укладываются одинаковые ветви обмотки, выводы которых прикреплены к контактным медным пластинам (ламелям), образующие коллектор ротора. На коллекторе ротора в среднем может быть 36 ламелей располагающихся на изоляторе и разделённые между собой зазором. Для обеспечения скольжения ротора, на его вал запрессовываются подшипники, опорами которых служат крышки корпуса двигателя. Так же, на вал ротора запрессован шкив с проточенными канавками для ремня, а на противоположной торцевой стороне вала есть отверстие с резьбой в которое прикручивается магнитный ротор тахогенератора.

Статор УКД

Конструкция статора УКД показана на рис. 5.3.

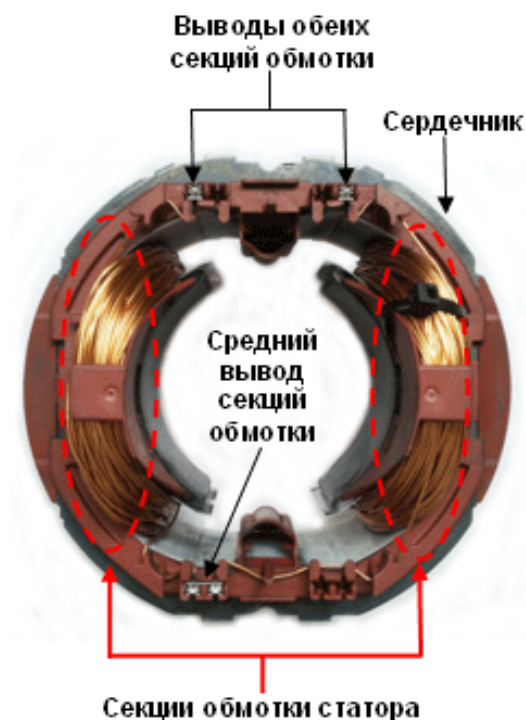


Рис.5.3 Статор коллекторного двигателя (вид с торца)

Статор – неподвижная часть двигателя (Рис.5.3). Для уменьшения вихревых токов, сердечник статора выполнен из наборных пластин электротехнической стали образующих каркас, на котором уложены две равные секции обмотки соединённые последовательно. У статора почти всегда есть только два вывода обеих секций обмотки. Но в некоторых двигателях применяется так называемое секционирование обмотки статора и дополнительно имеется третий вывод между секциями. Обычно это делается из-за того, что при работе двигателя на постоянном токе, индуктивное сопротивление обмоток оказывает меньшее сопротивление постоянному току и ток в обмотках выше, поэтому задействуются обе секции обмотки, а при работе на переменном токе включается лишь одна секция, так как переменному току индуктивное сопротивление обмотки оказывает большее сопротивление и ток в обмотке меньше. В универсальных коллекторных двигателях стиральных машин применяется тот же принцип, только

секционирование обмотки статора необходимо для увеличения количества оборотов вращения ротора двигателя. При достижении определённой скорости вращения ротора, электрическая схема двигателя коммутируется таким образом, чтобы включалась одна секция обмотки статора. В результате индуктивное сопротивление снижается и двигатель набирает ещё большие обороты. Это необходимо на стадии режима отжима (центрифугирования) в стиральной машине. Средний вывод секций обмотки статора применяется не во всех коллекторных двигателях.

Щеточный узел УКД

Конструкция щеточного узла УКД показана на рис. 5.4



Рис.5.4 Щётка коллекторного двигателя

Щётка – это скользящий контакт, является звеном электрической цепи, обеспечивающим электрическое соединение цепи ротора с цепью статора. Щётка крепится на корпусе двигателя и под определённым углом примыкает к ламелям коллектора. Применяется всегда как минимум пара щёток, которая образует так называемый щёточно-коллекторный узел. Рабочая часть щётки - графитовый брусок с низким удельным электрическим сопротивлением и низким коэффициентом трения. Графитовый брусок имеет гибкий медный или стальной жгутик с припаянной контактной клеммой. Для прижима бруска к коллектору применяется пружина. Вся конструкция заключена в изолятор и крепится к корпусу двигателя. В процессе работы двигателя, щётки

из-за трения о коллектор стачиваются, поэтому они считаются расходным материалом.

Тахогенератор

Часто для поддержания необходимой частоты вращения робота ЭКД используется датчик частоты вращения – тахогенератор, установленный в корпусе электродвигателя.



Рис.5.5 Тахогенератор

Тахогенератор (от др.-греч. *τάχος* – быстрота, скорость и генератор) – измерительный генератор постоянного или переменного тока, предназначенный для преобразования мгновенного значения частоты (угловой скорости) вращения вала в пропорциональный электрический сигнал. Тахогенератор предназначен для контроля скорости вращения ротора коллекторного двигателя. Ротор тахогенератора крепится напрямую к ротору двигателя и при вращении в обмотке катушки тахогенератора по закону взаимной индукции наводится пропорциональная электродвижущая сила (ЭДС). Значение переменного напряжения, считывается с выводов катушки и обрабатывается электронной схемой, а последняя в конечном итоге задаёт и контролирует необходимую, постоянную скорость вращения ротора двигателя.

Иногда в коллекторных двигателях вместо тахогенератора применяется датчик Холла.

Схема подключения обмоток УКД

Коллекторный двигатель стиральной машины имеет последовательную схему подключения обмоток.

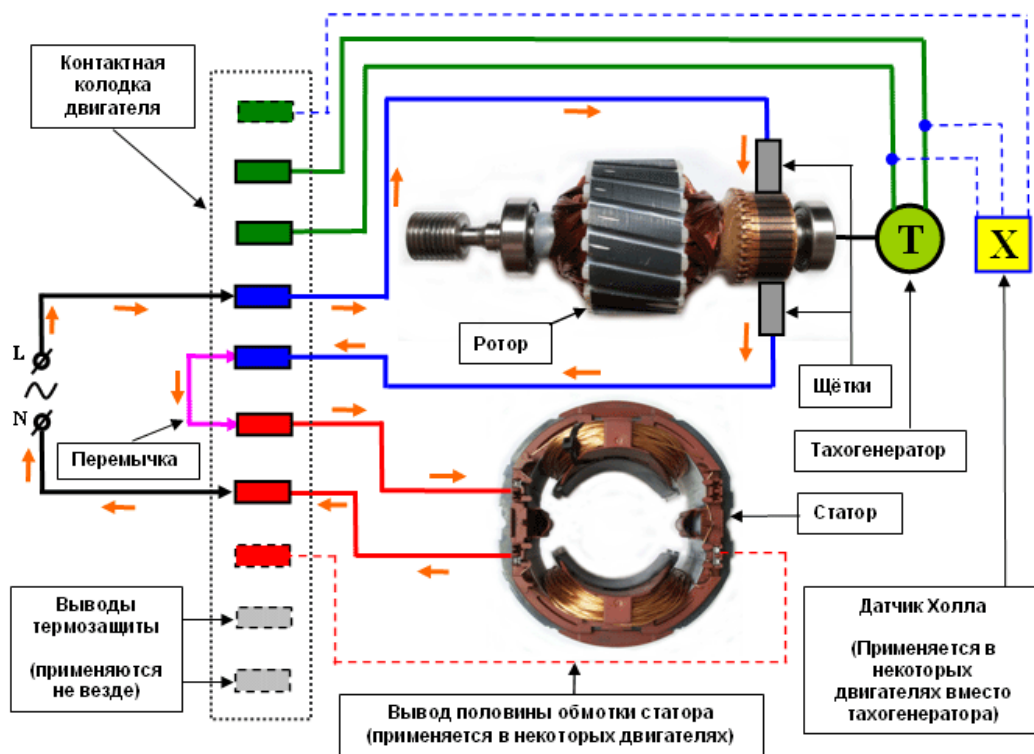


Рис.5.6 Схема подключения коллекторного двигателя

На схеме, жирными стрелочками условно показано направление тока по проводникам и обмоткам двигателя. От фазы (L) ток идёт через одну из щёток на коллектор, проходит по виткам обмотки ротора и выходит через другую щётку и через переключатель ток последовательно проходит по обмоткам обеих секций статора доходя до нейтрали (N). Такой тип двигателя независимо от полярности подаваемого напряжения вращается в одну сторону, так как за счёт последовательного соединения обмоток статора и ротора смена полюсов их магнитных полей происходит одновременно и результирующий момент остаётся направленным в одну сторону. Для того, чтобы двигатель начал вращаться в другую сторону, необходимо лишь изменить последовательность коммутации обмоток.

Пунктирной линией обозначены элементы и выводы, которые задействованы не во всех двигателях. Например датчик Холла, выводы термозащиты и вывод половины обмотки статора. При запуске коллекторного двигателя напрямую, подключаются только обмотки статора и ротора (через щётки).

Достоинства и недостатки универсальных коллекторных двигателей. К достоинствам можно отнести: компактные размеры, большой пусковой момент, быстроходность и отсутствие привязки к частоте сети, возможность плавного регулирования оборотов (момента) в очень широком диапазоне — от нуля до номинального значения — изменением питающего напряжения, возможность применения работы как на постоянном, так и на переменном токе.

Недостатки - наличие коллекторно-щёточного узла и в связи с этим: относительно малая надёжность (срок службы), искрение возникающее между щётками и коллектором из-за коммутации, высокий уровень шума, большое число деталей коллектора.

Неисправности коллекторных двигателей. Самая уязвимая часть двигателя – коллекторно-щёточный узел. Даже в исправном двигателе, между щётками и коллектором происходит искрение, которое довольно сильно нагревает его ламели. А при стачивании щёток до предела и вследствие их плохого прижима к коллектору, искрение порой достигает кульминационного момента представляющего электрическую дугу. В этом случае ламели коллектора сильно перегреваются и иногда отслаиваются от изолятора, образуя неровность, после чего, даже заменив изношенные щётки, двигатель будет работать с сильным искрением, что приведёт его к выходу из строя.

А иногда происходит межвитковое замыкание обмотки ротора или статора (значительно реже), что так же проявляется в сильном искрении коллекторно-щёточного узла (из-за повышенного тока) или ослаблении магнитного поля двигателя, при котором ротор двигателя не развивает полноценный крутящий момент.

Щётки в коллекторных двигателях при трении о коллектор со временем стачиваются. Поэтому большая часть всех работ по

ремонту двигателей сводится к замене щёток. Стоит отметить, что надёжность коллекторного двигателя во многом зависит от того, насколько качественно и грамотно производители подходят к технологическому процессу его изготовления и сборки.

5.3. Описание лабораторного стенда

Структурная схема лабораторного стенда показана на рис. 5.7.

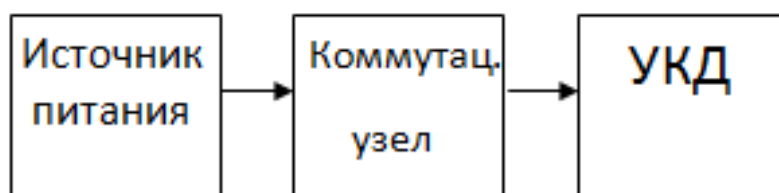


Рис. 5.7 Схема лабораторного стенда

Внешний вид стенда покажем на рис. 5.8.

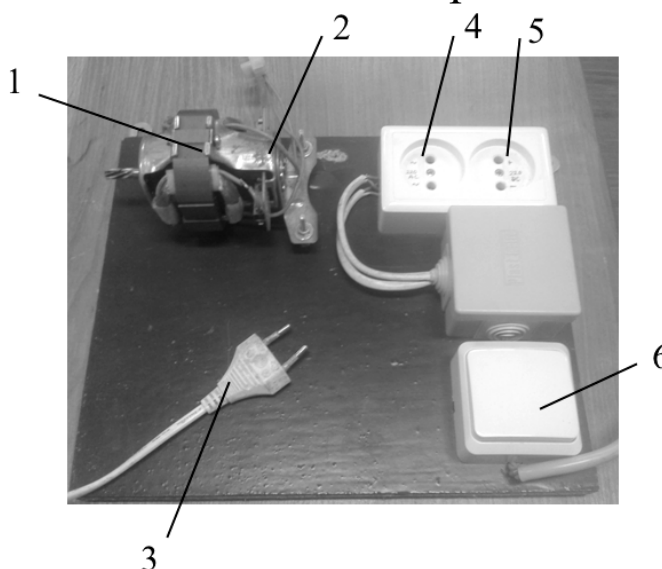


Рис. 5.8. Внешний вид лабораторного стенда

Стенд состоит из следующих основных элементов:

- 1 – универсальный коллекторный двигатель;
- 2 – коллекторный узел;
- 3 – вилка подключения УКД к разъемам питания;
- 4 – разъем питания постоянного тока
- 5 – разъем питания переменного тока
- 6 – выключатель двигателя УКД

5.4. Ход работы

1. Изучить теоретические основы устройства и принципа работы УКД.
2. Используя лабораторный стенд, определить расположение конструктивных узлов электродвигателя.
3. Подключить лабораторный стенд к сети.
4. Запустить электродвигатель от переменного тока.
5. Измерить ток обмоток с помощью цифрового амперметра, записать показания.
6. Подключить электродвигатель от постоянного тока.
7. Измерить потребляемый ток, сравнить со значениями полученными ранее.
8. Отключить стенд от сети.
9. Подготовить отчет с объяснением полученных результатов.

5.5. Контрольные вопросы

1. Что такое бесколлекторный двигатель?
2. Классификация бесколлекторный двигателей.
3. Устройство и принцип действия БД.
4. Особенности конструкции БД,
5. Достоинства и недостатки БД.
6. Способы управления БД
7. Способы реализации устройств управления БД
8. Достоинства и недостатки БД по сравнению с ДПТ НВ
9. Механическая характеристика БД.

Библиографический список

1. Овчинников, И. Е. Электромеханические и мехатронные системы [Текст]: учебное пособие / И. Е. Овчинников. - Санкт-Петербург: Корона.Век. Ч. 1: Полупроводниковые устройства в цепи электрических машин. Коллекторные и бесконтактные двигатели постоянного тока. Конструкции, характеристики, регулирование, динамика разомкнутых систем. - 2015. - 396 с.
2. Данилов, П.Е. Теория электропривода: учебное пособие / П.Е. Данилов, В.А. Барышников, В.В. Рожков; Национальный исследовательский университет "МЭИ" в г. Смоленске. – Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2018. – 416 с.: ил., схем.,
3. Беспалов, В. Я. Электрические машины [Текст]: учебное пособие / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. - М.: Академия, 2006. - 320 с.
4. Робототехника и ГАП, кн.2 "Приводы робототехнических систем", под ред. Макарова И.М., М.: Высшая школа, 1986.
5. Карнаухов Н.Ф. Электромеханические и мехатронные системы. Ростов н/Д: Феникс, 2006.
6. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. М.: Издательский центр "Академия", 2004.
7. Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1998.
8. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов: Учеб. пособие для студ. Вузов / С.Ф. Бурдаков и др.- М.: Высш. шк., 1986.
9. Кувшинов, А.А. Теория электропривода : учебное пособие / А.А. Кувшинов, Э.Л. Греков; Оренбургский государственный университет. – Оренбург : Оренбургский государственный университет, 2017. – Ч. 3. Переходные процессы в электроприводе. – 114 с.