

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 03.02.2025 14:12:50  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5047601de37f1c1feabb75e9452f4a4b11da56d089

МИНОБРАЗОВАНИЯ 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  
« 20 » 01 2025 г.



**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИВОДЫ ДЛЯ  
МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ**

Методические указания по выполнению  
лабораторных работ  
для студентов направления  
«Нанотехнологии и микросистемная техника»

Курск 2025

УДК 537.9: 537.62

Составители: А.С. Яцун, Е.Н. Политов

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *П.А. Безмен*

**Электрические приводы для микро- и наносистемной техники:** методические указания по выполнению лабораторных работ для студентов направления «Нанотехнологии и микросистемная техника»/ Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А.С. Яцун, Е.Н. Политов. Курск, 2025. - 44 с.

Изложены краткие теоретические сведения и план проведения лабораторных работ по дисциплине «Электрические приводы для микро- и наносистемной техники», а также вопросы для самостоятельного рассмотрения.

Предназначены для студентов направления «Нанотехнологии и микросистемная техника» всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *30.09.25*. Формат 60x84 1\16  
Усл.печ.л. 2,56 .Уч.изд.л. 2,44.Тираж 10 экз. Заказ *54* .  
Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул.50 лет Октября, 94.

## Содержание

Введение	4
1 Электропривод на базе шагового двигателя	5
2 Электропривод на базе бесколлекторного двигателя	17
3 Исследование работы сервоприводов на базе коллекторного двигателя постоянного тока	24
4 Исследование работы электропривода на базе асинхронного двигателя	30
5 Исследование работы привода на базе универсального коллекторного электродвигателя	37

## ВВЕДЕНИЕ

Целью изучения дисциплины «Электрические приводы для микро- и наносистемной техники» является формирование у студентов базовых знаний об эффектах и процессах, лежащих в основе функционирования электроприводов для наносистемной техники, микромеханических и микроэлектромеханических систем, способами управления их параметрами, приемами эксплуатации, при создании элементной базы микро- и наносистем.

Лабораторные занятия включают в себя:

- а) теоретическую подготовку студента к занятию, в ходе которой студент обязан осмыслить теоретический материал, выносимый на занятие, и заучить основные законы и формулы;
- б) выполнение лабораторной работы на занятии;
- в) написание отчета по выполненной лабораторной работе;
- г) защита лабораторной работы.

Каждый отчет должен быть подготовлен самостоятельно и соответствовать требованиям:

- отчет содержит титульный лист, описание выполняемого задания, описание проделанной работы, анализ полученных результатов, выводы, список использованной литературы;
- отчет выполняется на листах формата А4, 14 кегль, одинарный межстрочный интервал;
- список литературы оформляется согласно ГОСТ 7.1-2003.

# 1 ЭЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗЕ ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

## 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 удастся. 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  $30^\circ$ .

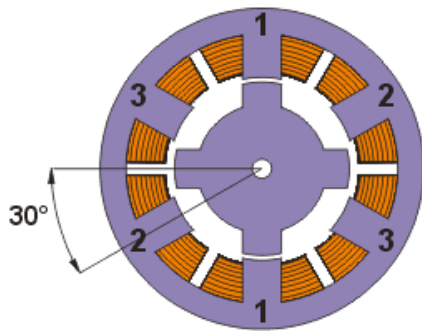


Рис. 1. Двигатель с переменным магнитным сопротивлением

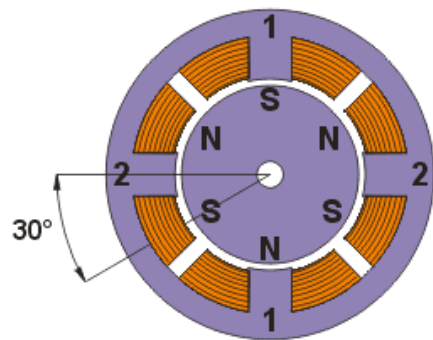


Рис. 2. Двигатель с постоянными магнитами

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. 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.

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  $30^\circ$ . 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.

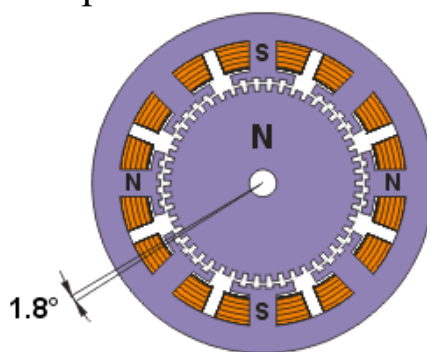


Рис. 3. Гибридный ШД

Ротор разделен на две части, между которыми расположен цилиндрический постоянный магнит. Таким образом, зубцы верхней половинки ротора являются северными полюсами, а зубцы нижней половинки – южными. Кроме того, верхняя и нижняя половинки 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.

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

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***

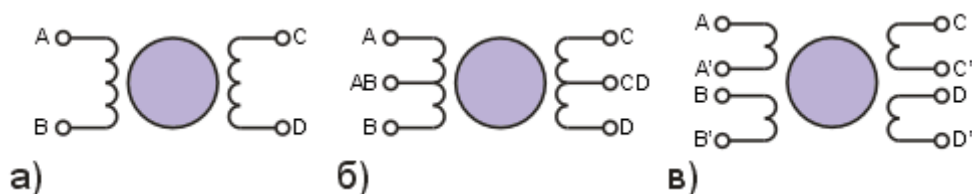


Рис. 4 Биполярный двигатель (а), униполярный (б) и четырехобмоточный (в)

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 5, 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 5, 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.

Первый способ обеспечивается попеременной коммутацией фаз, при этом они не перекрываются, в один момент времени включена только одна фаза (рисунок 6, 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.

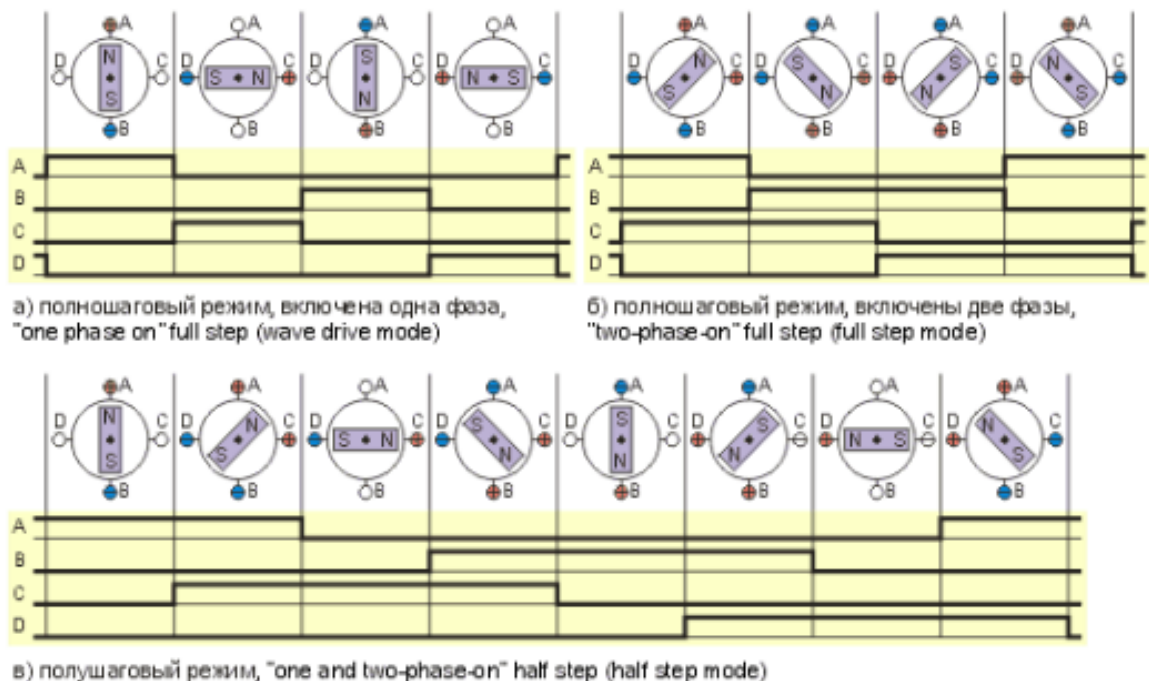


Рис. 6. Последовательности коммутации фаз:  
а – волновая, б – шаговая, в – полушаговая

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 6, 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 6, 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 запитан 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 полушаговом 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;

#### 4. Описание лабораторного стенда

Внешний вид стенда для исследования работы двигателя постоянного тока показан на рис. 7.

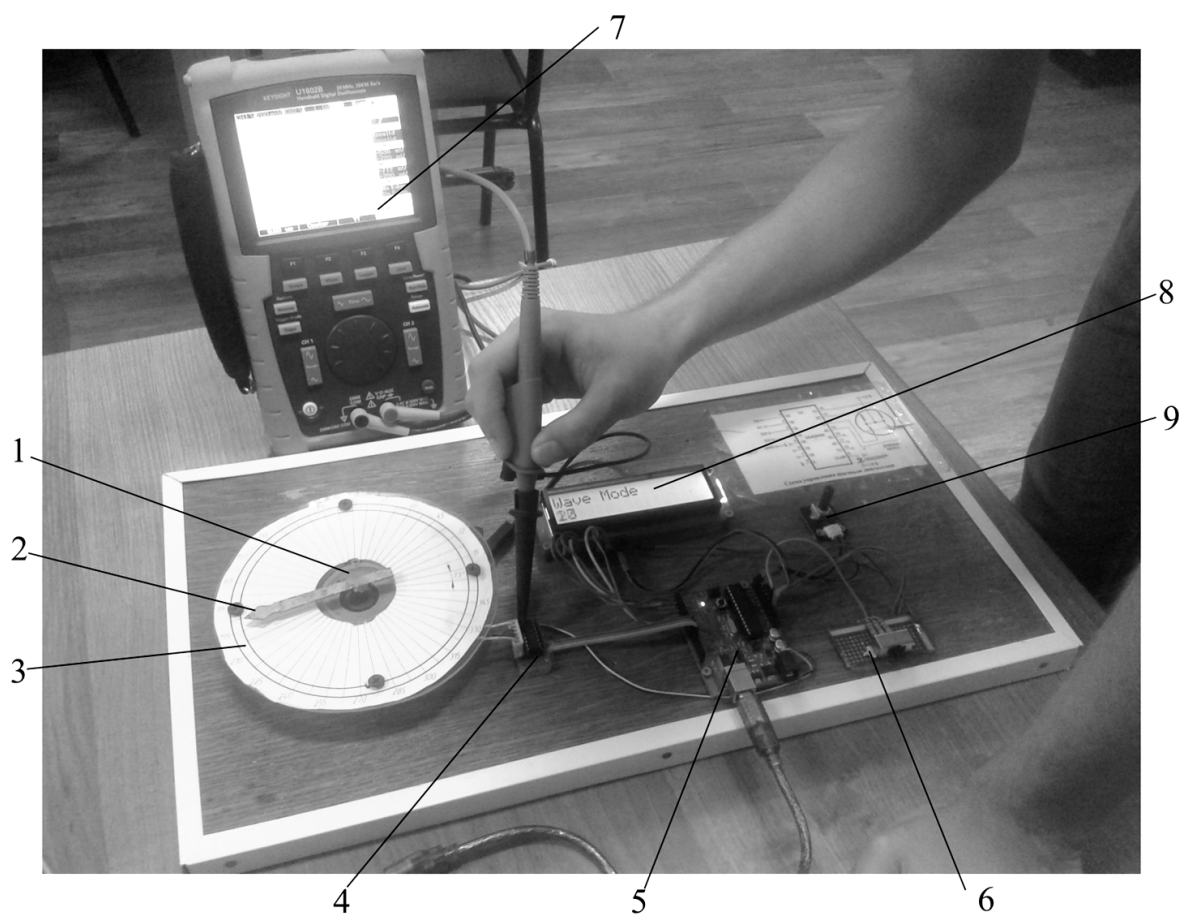


Рис. 7. Внешний вид стенда в процессе измерений

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.

## 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 2,3, для всех режимов коммутации обмоток.
- 9) Оформить отчет о лабораторной работе.

## 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.



## 2 ЭЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗЕ БЕСКОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

### 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.

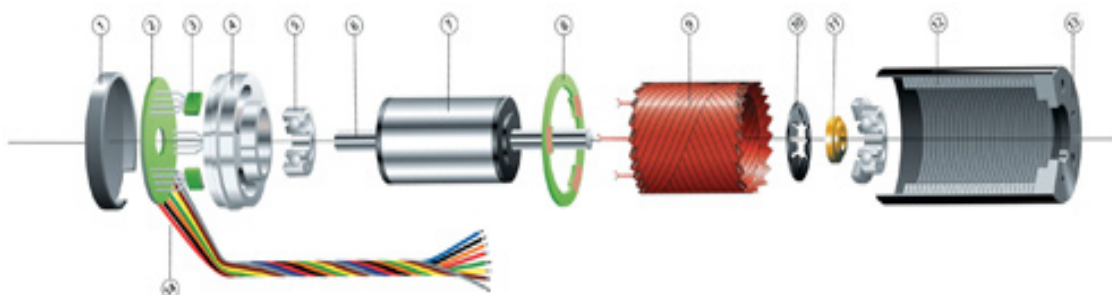


Рис. 1. Структура датчиков бесколлекторного двигателя:

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 момента 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. противоЭДС 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.

### ***3.2. 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 реакторpeak) 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.

### ***3.3. 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  $\pm 30$  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 max 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.

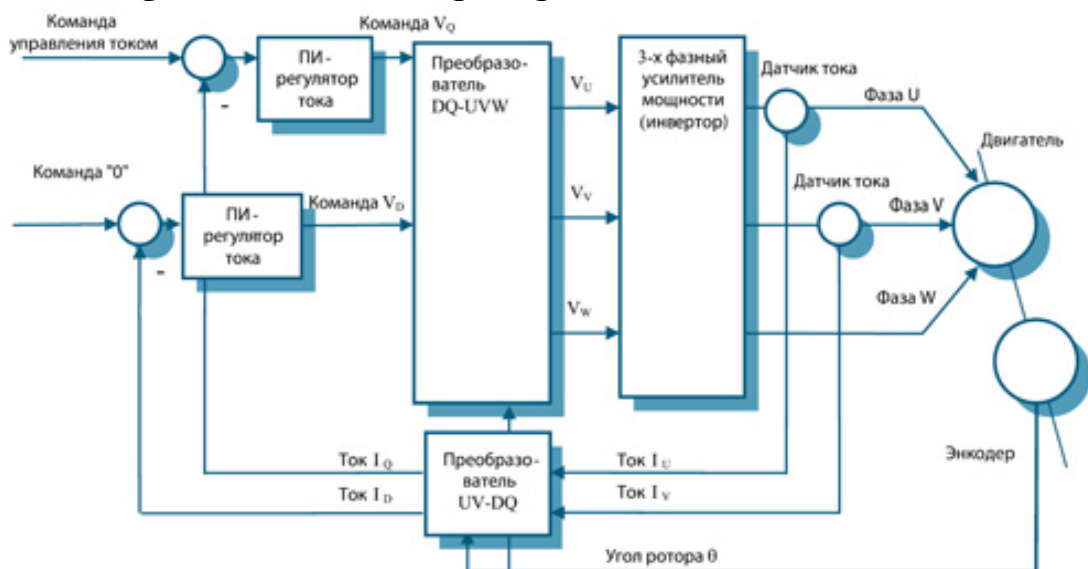


Рис. 2 Векторный контроль тока вентильного двигателя

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. 3).



Рис. 3 Двигатели Dunkermotoren серии VG

### **3.5. 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. 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

### **3 ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СЕРВОПРИВОДОВ НА БАЗЕ КОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

#### **Краткие теоретические сведения**

Сервопривод - механический привод, имеющий в составе датчик (положения, скорости, усилия и т.п.) и блок управления приводом (электронную схему или механическую систему тяг), автоматически поддерживающий необходимые параметры на датчике согласно заданному внешнему значению.

Сервопривод является «автоматическим точным исполнителем» — получая на вход значение управляющего параметра (в режиме реального времени), он «своими силами» (основываясь на показаниях датчика) стремится создать и поддерживать это значение на выходе исполнительного элемента.

К сервоприводам, как к категории приводов, относится множество различных регуляторов и усилителей с отрицательной обратной связью, например, гидро/электро/пневно- усилители ручного привода управляющих элементов (в частности, рулевое управление и тормозная система на тракторах и автомобилях), однако термин «сервопривод» чаще используется для обозначения электрического привода с обратной связью по положению, применяемого в автоматических системах для привода управляющих элементов и рабочих органов.

Микро сервопривод на базе коллекторного двигателя постоянного тока (сервомашинка)

Сервомашинка это краеугольный камень механики радиоуправляемых моделей, а последнее время и домашней робототехники. Представляет собой небольшой блок с двигателем, редуктором и схемой управления. На вход сервомашинки подается питание и управляющий сигнал, задающий угол на который надо выставить вал сервопривода.

Управление сервомашинками стандартизировано. Отдельные модели различаются усилием на валу, быстродействием, точностью управления, габаритами, весом и материалом изготовления шестеренок. Цена колеблется от 200-300 рублей до нескольких тысяч.

#### **Конструкция сервомашинки**



Сервопривод, показанный на рис. 1 состоит из следующих основных элементов: коллекторный двигатель постоянного тока, зубчатый цилиндрический редуктор, резистивный потенциометр, схема управления, включающая усилительную схему.

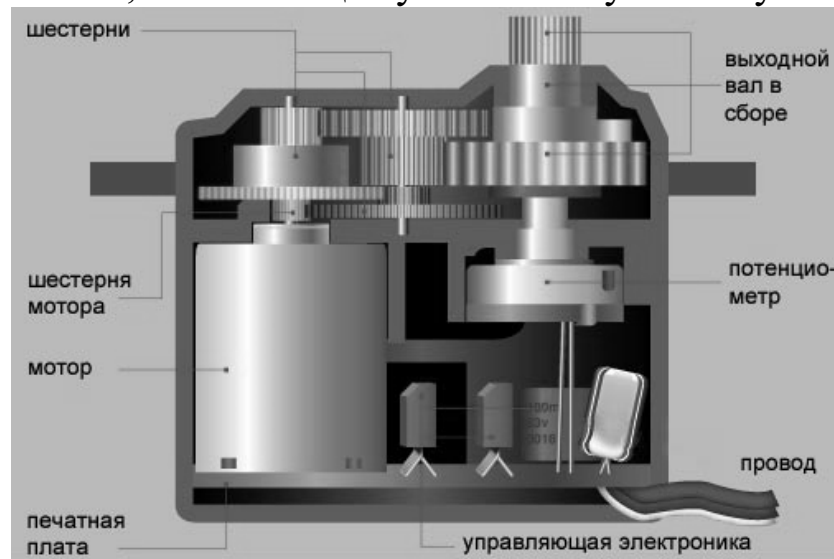


Рис. 1 Конструкция сервопривода

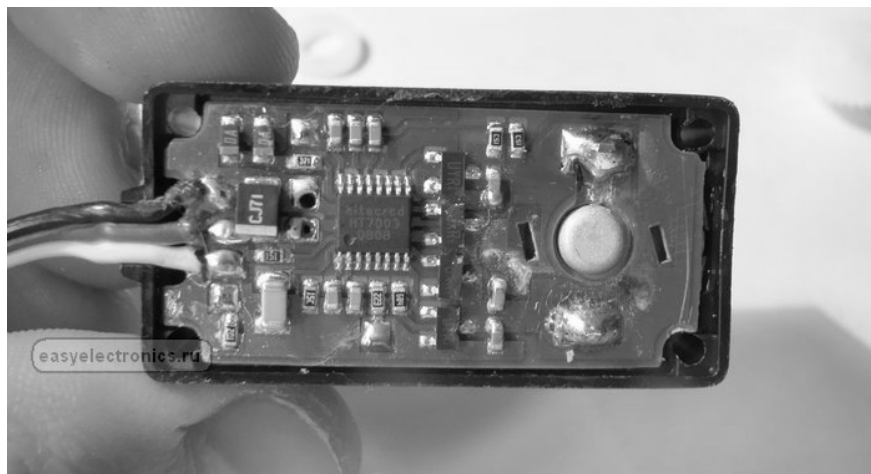


Рис. 2 Внешний вид схемы управления сервопривода

Драйверная схема включает в себя четыре транзистора, образующие Н-мост позволяющий реверсировать вращение двигателя постоянного тока.

### **Регулирование положением выходного вала**

Сервопривод управляется импульсным сигналом постоянной частоты и различной шириной импульса. Ширина импульса задает требуемое положение выходного вала сервомашинки.

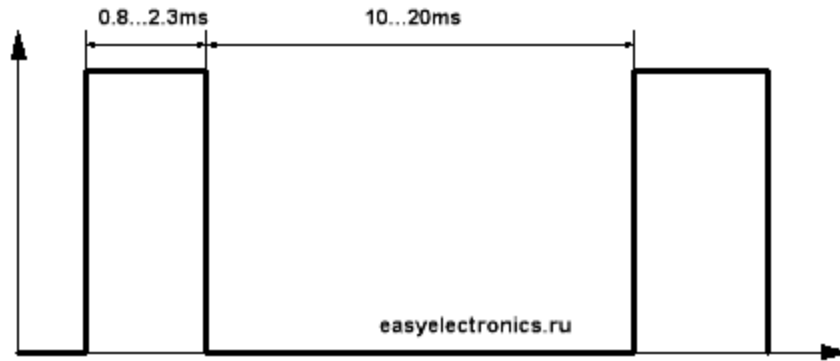


Рис.3 Диапазон изменения ширины и длительности импульса

Согласно рис.3 - 0.8мс это примерно 0 градусов, крайне левое положение. 2.3мс это около 170 градусов — крайне правое. 1.5мс — среднее положение. Между импульсами производитель рекомендует давать 20мс.

### **Принцип организации управления**

Когда на вход приходит импульс, то он своим передним фронтом запускает одновибратор внутри сервомашинки. Одновибратор это блок выдающий один импульс заданной длительности по запускающему фронту. Длительность этого внутреннего импульса зависит исключительно от положения переменного резистора, т.е. от текущего положения выходного вала.

Далее эти два импульса сравниваются. Если внешний импульс короче внутреннего, то эта разность подается на двигатель в одной полярности. Если внешний импульс длиннее внутреннего, то полярность подачи на движок будет другой. Под действием одного импульса привод ступенчато перемещается в сторону уменьшения разности. Так как импульсы идут часто (20мс между каждым) то на двигатель идет подобие ШИМа. И чем больше разность между заданием и текущим положением, тем больше коэффициент заполнения и двигатель активнее стремится эту разность ликвидировать.

В итоге, когда импульсы задающие и внутренние сравниваются по длительности двигатель остановится.

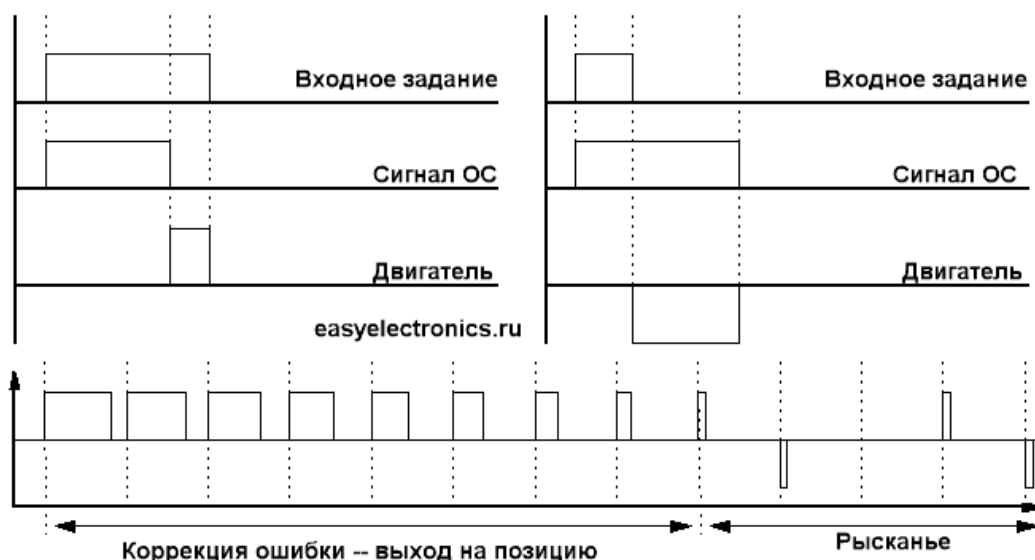


Рис.4 Схема формирования управляющего напряжения

На рис. 4 изображены два случая: когда задающий импульс длинней внутреннего и когда короче. В нижней части рисунка показано как выглядит управляющий сигнал подаваемый на двигатель при выходе на заданную точку.

Частота следования импульсов определяет быстродействие, с которым сервомашинка будет обрабатывать заданное положение. Минимальный интервал, выше которого скорость перестает возрастать, а дребезг усиливается это порядка 5-8мс. Более 20мс паузы приводит к потере быстродействия в отклике сервопривода. Оптимальная пауза около 10-15мс.

#### **Преимущества перед шаговым двигателем:**

- не предъявляет особых требований к электродвигателю и редуктору - они могут быть практически любого нужного типа и мощности (а шаговые двигатели, как правило, маломощны и тихоходны);
- автоматически компенсирует люфты в приводе и его износ;
- гарантирует максимальную точность (по датчику) в течении всего срока эксплуатации (у шагового двигателя происходит постепенный "уход" при износе редуктора и требуется периодическая юстировка);
- большая возможная скорость перемещения элемента (у шагового двигателя меньшая максимальная скорость по сравнению с другими типами электродвигателей);

- затраты энергии пропорциональны сопротивлению элемента (на шаговый двигатель постоянно подаётся номинальное напряжение с запасом по возможной перегрузке);

- мгновенная диагностика в случае поломки (заедания) привода;

### **Недостатки в сравнении с шаговым двигателем**

- необходимость в дополнительном элементе - датчике;
- сложнее блок управления и логика его работы (требуется обработка результатов датчика и выбор управляющего воздействия, а в основе контроллера шагового двигателя - просто счётчик);
- проблема фиксирования: обычно решается постоянным притормаживанием перемещаемого элемента либо вала электродвигателя (что ведёт к потерям энергии) либо применение червячных/винтовых передач (усложнение конструкции) (в шаговом двигателе каждый шаг фиксируется самим двигателем).
- сервоприводы, как правило, дороже шаговых.

## **3. Описание лабораторного стенда**

Изучение принципов построения мехатронных систем на базе сервоприводов, а также принципов формирования управляющих воздействий предлагается выполнять на примере последовательного манипулятора, звенья которого приводятся в движение посредством сервоприводов на базе ДПТ. Внешний вид стенда показан на рис. 5.

## **4. Ход работы**

В ходе выполнения лабораторной работы необходимо выполнить следующее:

1. Изучить краткие теоретические сведения, касающиеся принципов работы и управления сервоприводами на базе двигателей постоянного тока.
2. Написать программу для микроконтроллера обеспечивающую перемещение выходного звена сервопривода.
3. Написать программу перемещения захвата манипулятора
4. Оформить циклограммы работы сервоприводов, сделать анализ полученных результатов, выводов.

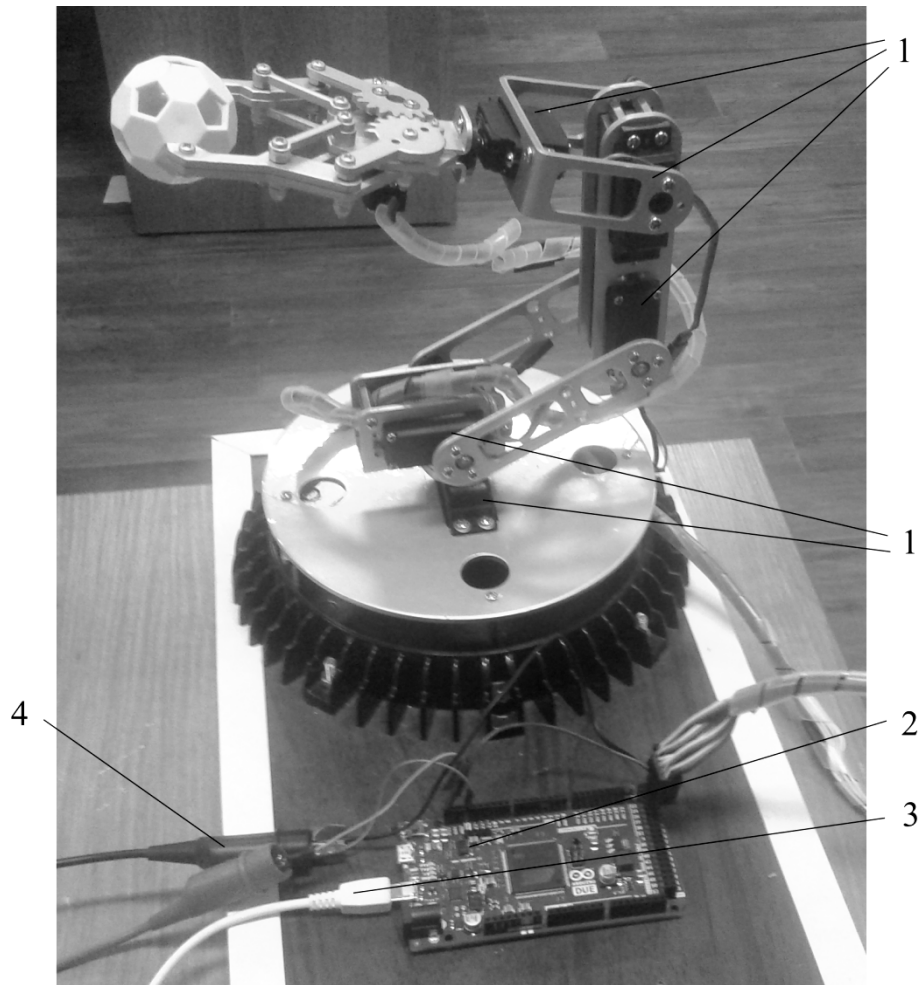


Рис. 5. Внешний вид стенда

На данном рисунке цифрами обозначены:

- 1 – сервоприводы,
- 2 – управляющий микроконтроллера,
- 3 – провод для подключения к ПК,
- 4 – подключение источника питания.

# НА БАЗЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

## 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.

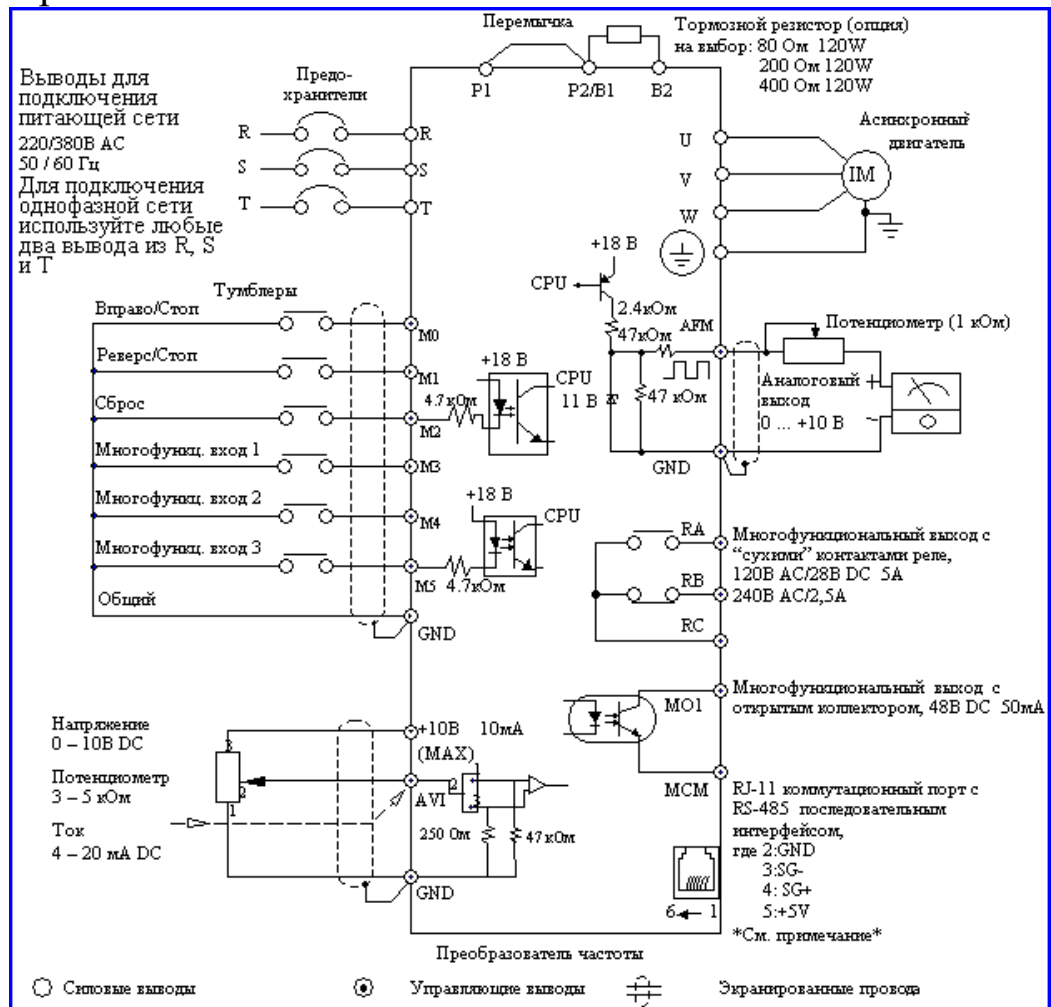


Рис. 1. Типовая схема подключения инвертора

На типовой схеме подключения инвертора (рис. 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), расположенный на планке управляющих терминалов.

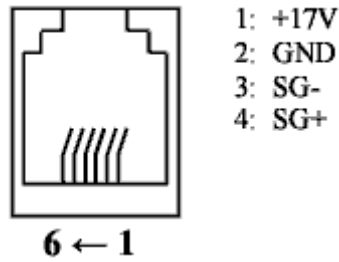


Рис.2. Разъем RJ-11

При соединении инвертора с компьютером используется RS232/422/485 USB конвертор (рис. 3).

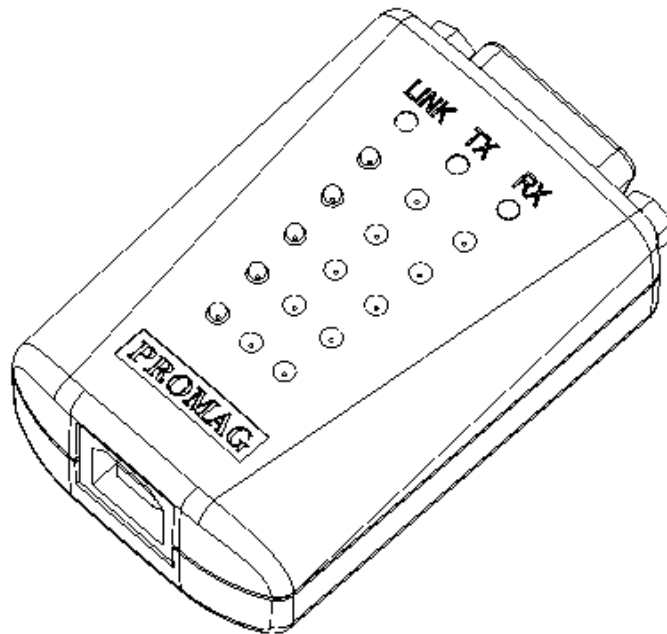


Рис. 3. Внешний вид конвертора RS232/422/485 USB

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. 1).

Табл. 1

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

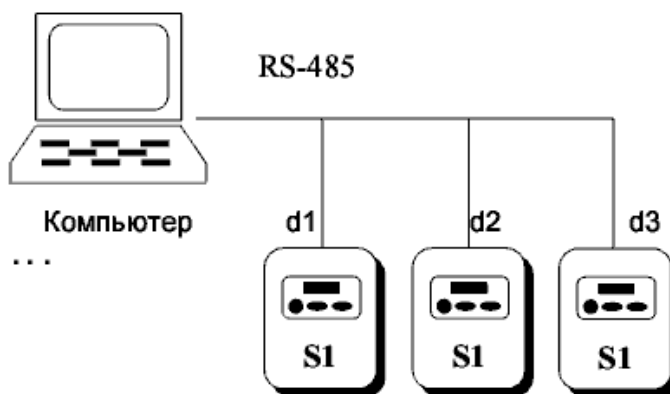


Рис. 4. Одновременное управление несколькими инверторами от одного компьютера

Другие основные параметры, необходимые для корректной работы компьютера с инвертором приведены ниже (табл. 2, табл. 3).

<b>9-01</b>	<b>Скорость передачи данных</b>	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. 3

<b>9-04</b>	<b>Протокол коммуникации</b>	Заводская установка: d1
	Возможные значения: d0: Modbus ASCII режим, <7, N, 2>; d1: Modbus ASCII режим, <7, E, 1>; d2: Modbus ASCII режим, <7, 0, 1>; d3: Modbus ASCII режим, <8, N, 2>; d4: Modbus ASCII режим, <8, E, 1>;	
		Дискретность: 1



d5: Modbus ASCII режим, <8, 0, 1>; d6: Modbus RTU режим, <8, N, 2>; d7: Modbus RTU режим, <8, E, 1>; D8: Modbus RTU режим, <8, 0, 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. 4).

Табл. 4

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. 5.

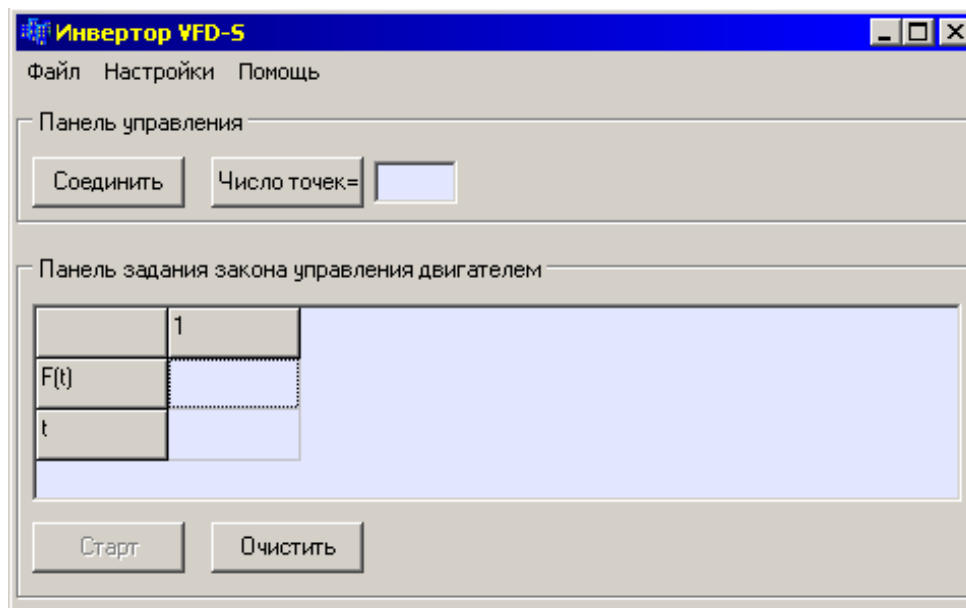


Рис. 5. Интерфейс программы управления инвертором

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.

### 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.

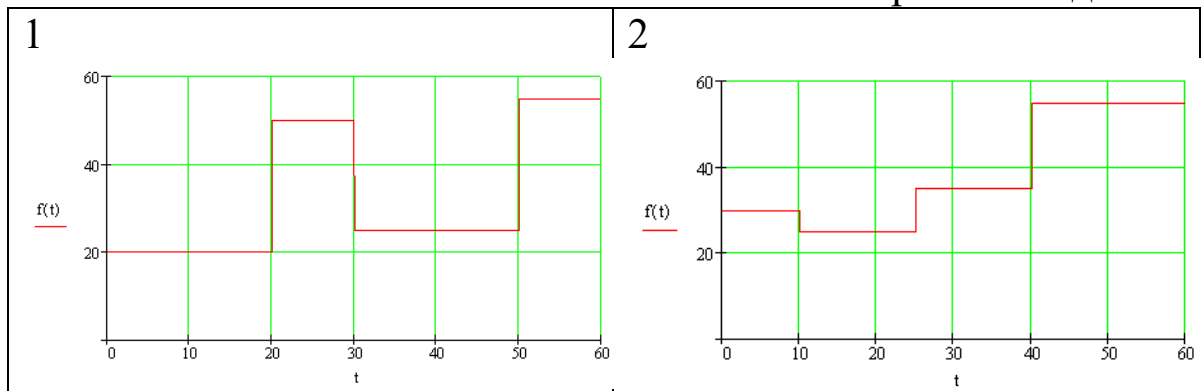
5. Нажать кнопку «Старт» и проследить изменение частоты, генерируемой инвертором и скорости вращения асинхронного двигателя.

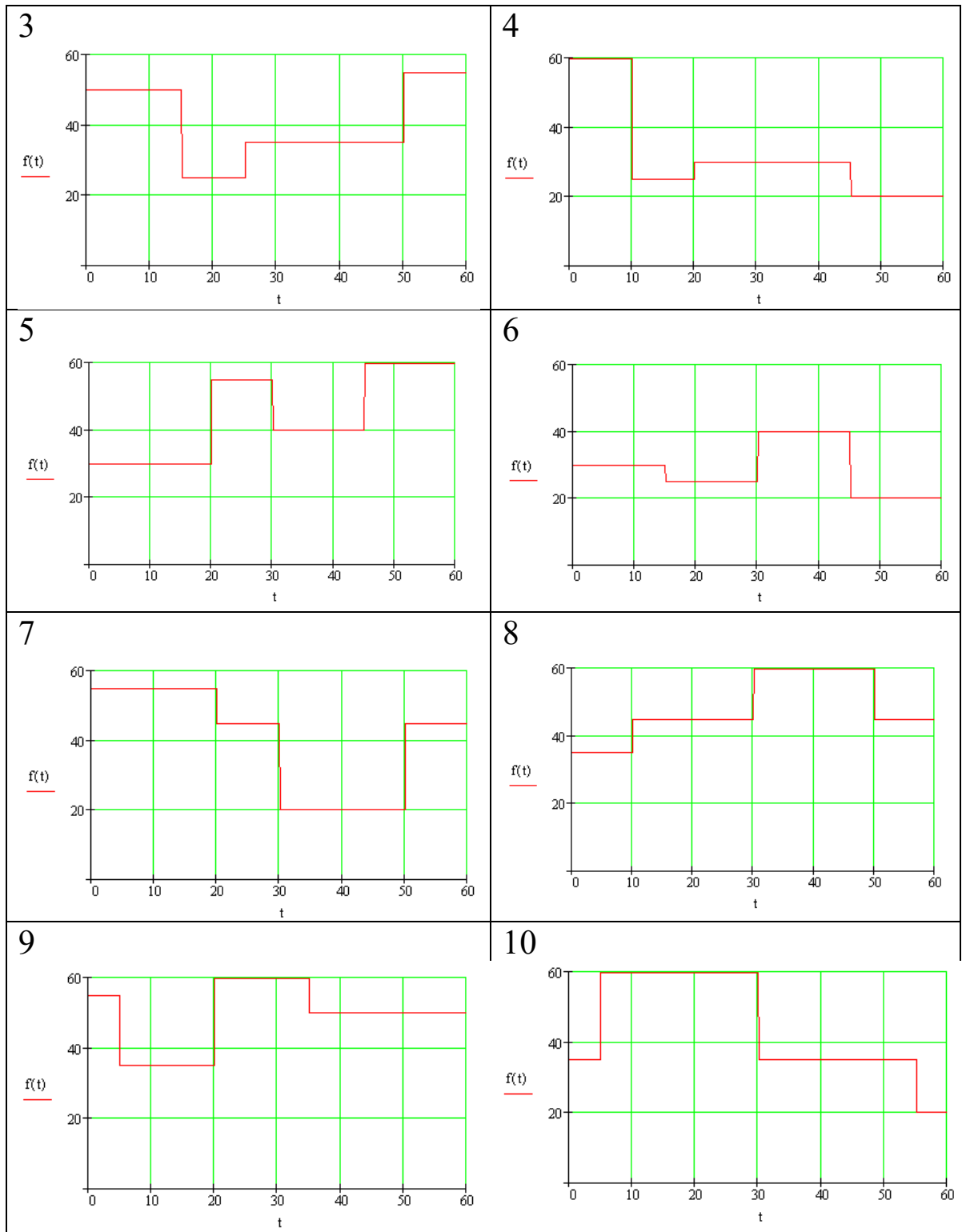
6. Проанализировать полученные результаты, написать выводы.

#### 4. Варианты заданий

Исходные данные выбираются согласно варианту по табл. 5.

Табл. 5. Варианты заданий





## 5 ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПРИВОДА НА БАЗЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО КОЛЛЕКТОРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

### 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 1.

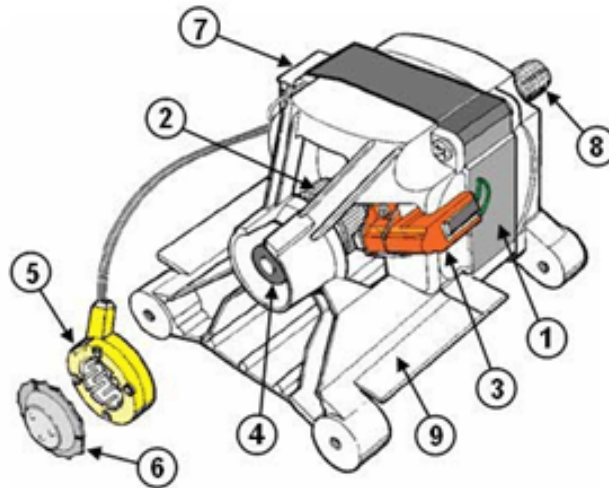


Рис. 1 Коллекторный электродвигатель стиральной машины: 1 – статор, 2 – коллектор, 3 – щетка коллекторного узла, 4 – магнитный ротор тахогенератора, 5 – обмотки тахогенератора, 6 – стопорная крышка тахогенератора, 7 – клеммная колодка двигателя, 8 – шкив, 9 – корпус двигателя.

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

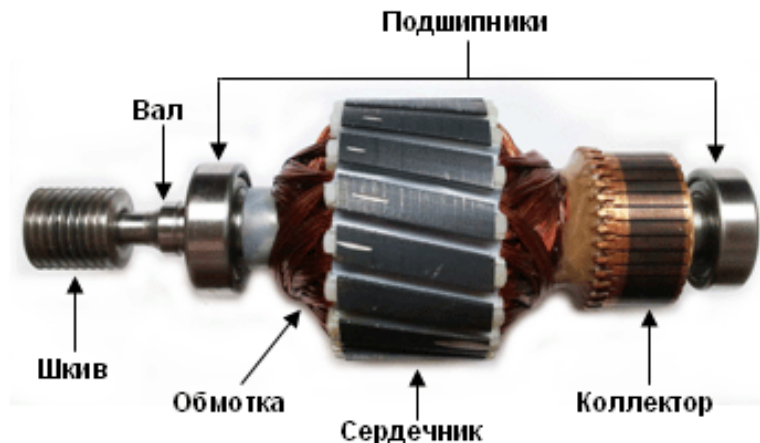


Рис.2 Ротор (якорь) коллекторного двигателя

Ротор (якорь) - вращающаяся (подвижная) часть двигателя (Рис.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

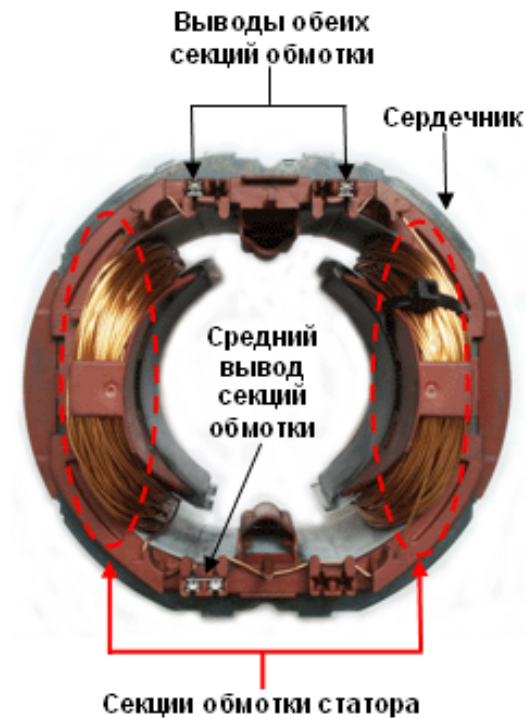


Рис.3 Статор коллекторного двигателя (вид с торца)

Статор - неподвижная часть двигателя (Рис.4). 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



Рис.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 работа ЭКД используется датчик частоты вращения – тахогенератор, установленный в корпусе электродвигателя.





Рис.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.

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 перемычку 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.

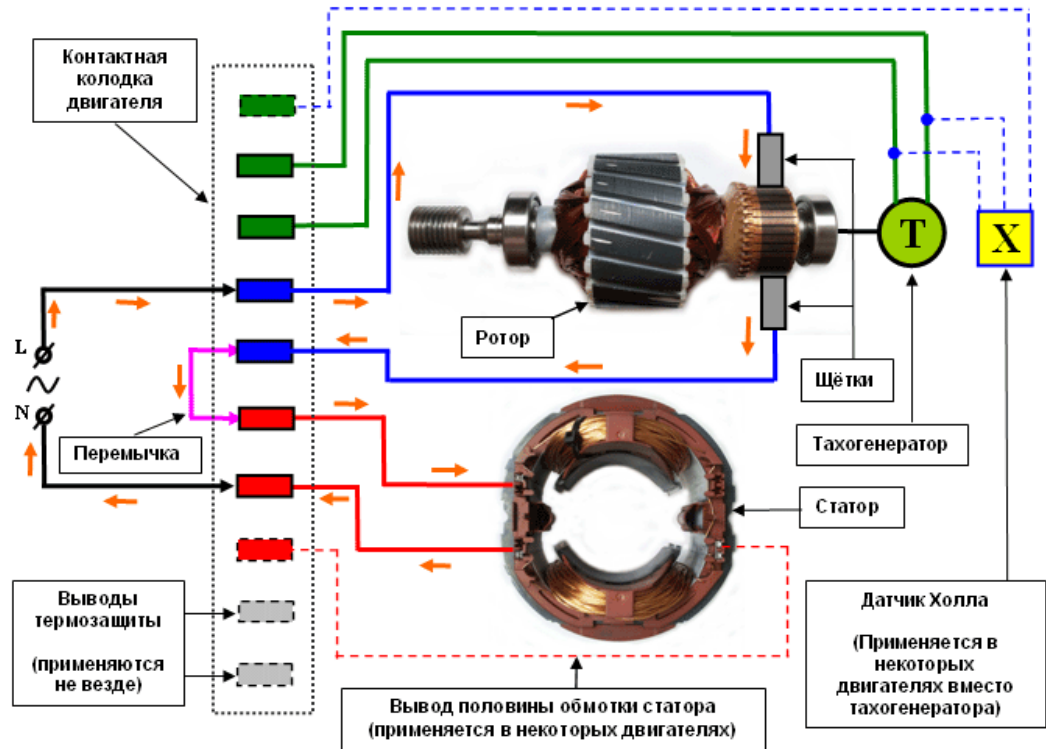


Рис.6 Схема подключения коллекторного двигателя

Пунктирной линией обозначены элементы и выводы, которые задействованы не во всех двигателях. Например датчик Холла, выходы 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.

### **3. Описание лабораторного стенда**

Структурная схема лабораторного стенда показана на рис. 7.

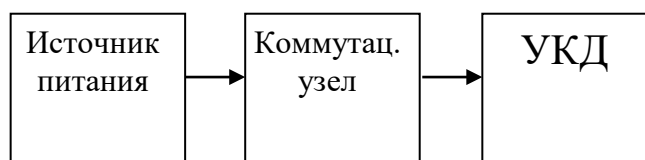


Рис. 7 Схема лабораторного стенда

Внешний вид стенда покажем на рис. 8.

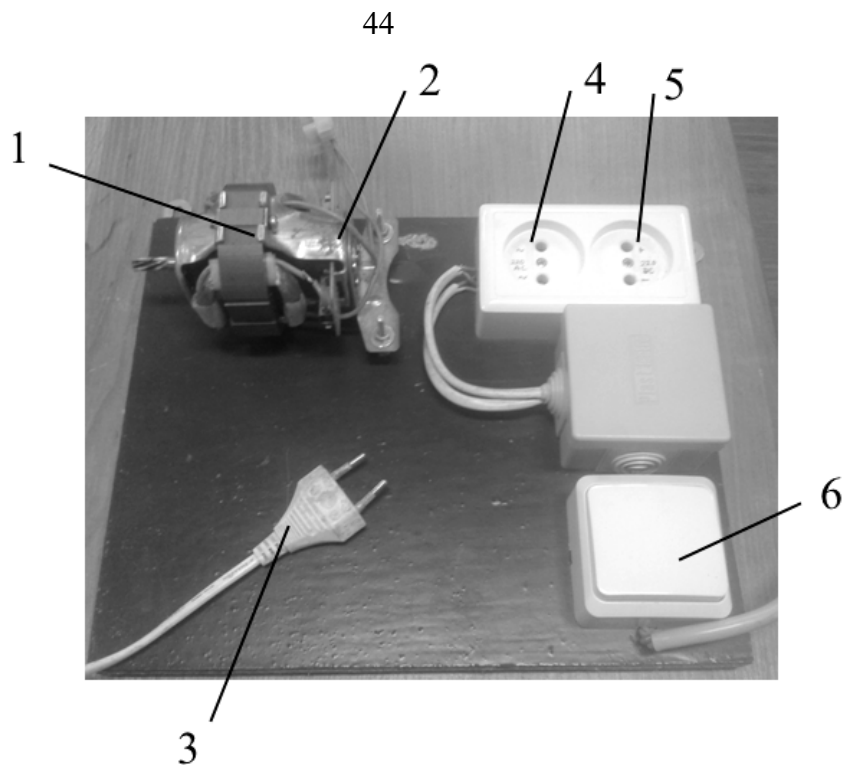


Рис. 8. Внешний вид лабораторного стенда

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

#### 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.