

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 18.12.2021 15:04:31  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

**МИНОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИИ**

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

Кафедра механики, мехатроники и робототехники



**ЭЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗЕ ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы по  
дисциплине «Электрические и гидравлические приводы  
мехатронных и робототехнических устройств» для студентов  
направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»

Курск 2016

УДК 621.(076.1)

Составители: Мальчиков А.В., Лушников Б.В.

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *Е.Н. Политов*

**Электропривод на базе шагового двигателя: методические указания к выполнению лабораторной работы / Юго-Зап. гос. ун-т; сост. А.В. Мальчиков, Б.В. Лушников. – Курск, 2016. – 18 с., 7 ил. – Библиограф.: 18 с.**

Содержат сведения по вопросам работы электроприводов на базе шаговых двигателей. Приводится пример выполнения лабораторной работы, краткие теоретические положения и контрольные вопросы для защиты работы.

Методические указания соответствуют требованиям программы, утверждённой учебно-методическим советом по направлениям Мехатроника и робототехника.

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

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 5.08.16. Формат 60x84 1/16

Усл.печ.л. 0,9 Уч.-изд.л. 0,8 Тираж 20 экз. Заказ Бесплатно 45/

Юго-Западный государственный университет.

305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94

## Содержание

1 Цель и задачи работы .....	4
2 Задание на лабораторную работу .....	5
3. Краткие теоретические сведения .....	6
4. Описание лабораторного стенда .....	16
5. Ход работы.....	17
6. Контрольные вопросы .....	17
Библиографический список .....	18

## 1 Цель и задачи работы

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

Данная работа входит в состав модуля «Электрические и гидравлические приводы мехатронных и робототехнических устройств», выполняется в ходе лабораторного занятия «Электропривод на базе шагового двигателя».

Выполнение работы ориентировано на формирование у студентов следующих элементов профессиональных компетенций:

ПК-1 – способностью составлять математические модели мехатронных и робототехнических систем, их подсистем и отдельных элементов и модулей, включая информационные, электромеханические, гидравлические, электрогидравлические, электронные устройства и средства вычислительной техники

ПК-11 – способностью производить расчеты и проектирование отдельных устройств и подсистем мехатронных и робототехнических систем с использованием стандартных исполнительных и управляющих устройств, средств автоматики, измерительной и вычислительной техники в соответствии с техническим заданием

ПК-13 – Готовностью участвовать в проведении предварительных испытаний составных частей опытного образца мехатронной или робототехнической системы по заданным программам и методикам и вести соответствующие журналы испытаний

По итогам выполнения и защиты работы студент должен владеть следующими знаниями, навыками и умениями, представленными в табл. 1

Табл. 1 Уровни сформированности компетенций

<b>Уровни сформированности компетенций</b>		
<b>Пороговый (удовлетворительный)</b>	<b>Продвинутый (хороший)</b>	<b>Высокий (отличный)</b>
<b>знать:</b> основные методы разработки математических моделей приводов на базе ШД	<b>знать:</b> основные методы разработки математических моделей автоматизированных приводов на базе ШД	<b>знать:</b> методы разработки математических моделей и методы численного моделирования автоматизированных приводов на базе ШД
<b>уметь:</b> рассчитать основные параметры электропривода на базе ШД	<b>уметь:</b> рассчитать основные параметры и характеристики электропривода на базе ШД	<b>уметь:</b> определить параметры электропривода на базе ШД и характеристики регулятора
<b>владеть:</b> навыками постановки натурального эксперимента с ШД	<b>владеть:</b> навыками постановки натуральных экспериментов с ШД и их анализа	<b>владеть:</b> навыками проведения натуральных испытаний управляемого электропривода на базе ШД

## **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, полушаговый, комбинированный).
4. Проанализировать полученные результаты, сделать выводы

### 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  $30^\circ$ .

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.

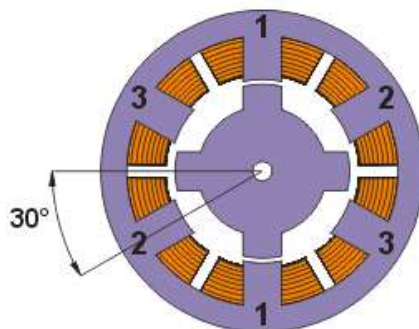


Рис. 1. Двигатель с переменным магнитным сопротивлением

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. 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.

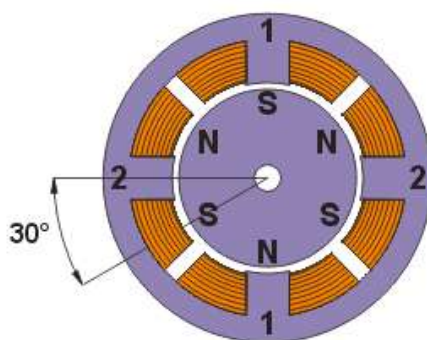


Рис. 2. Двигатель с постоянными магнитами



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  $30^\circ$ . 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.

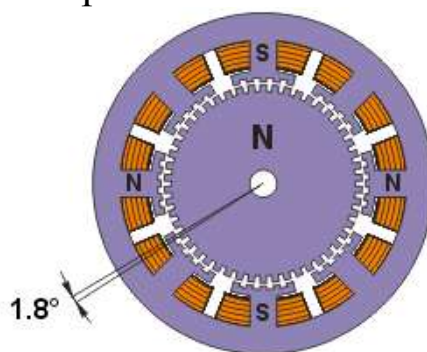


Рис. 4. Гибридный ШД

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  $\alpha$  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 5, а).

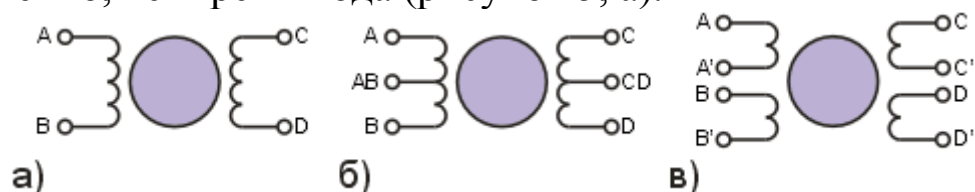


Рис. 5 Биполярный двигатель (а), униполярный (б) и четырехобмоточный (в)

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.

### **Способы управления шаговым двигателем**

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.

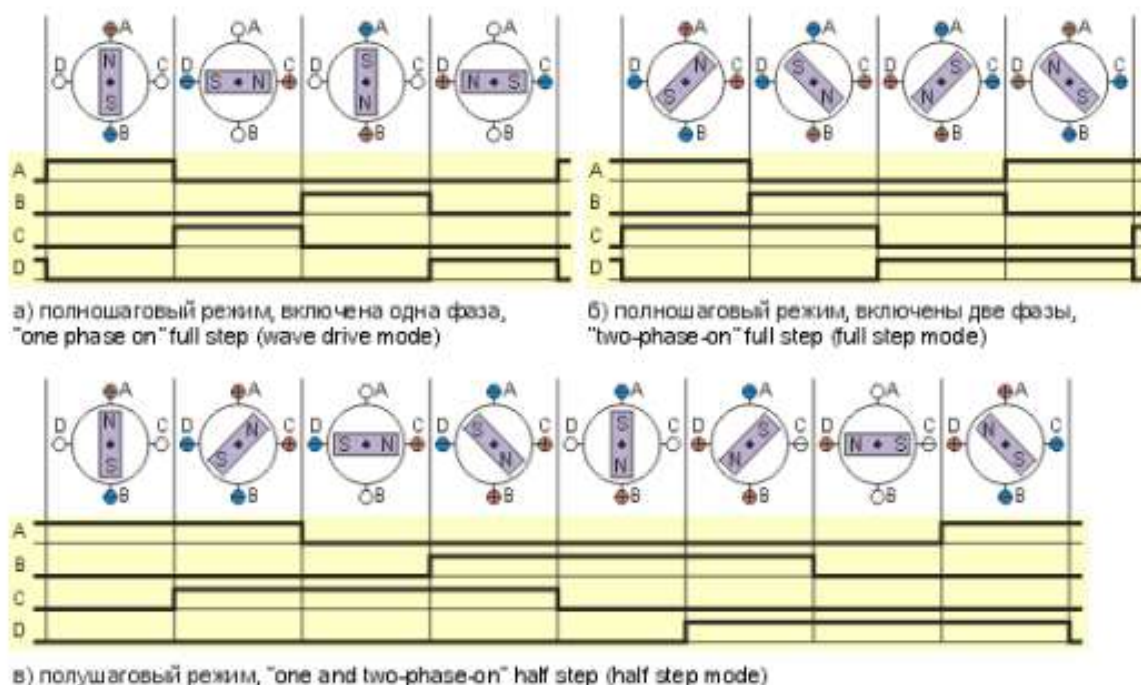


Рис. 6. Последовательности коммутации фаз:  
а – волновая, б – шаговая, в – полушаговая

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 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;

#### 4. Описание лабораторного стенда

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

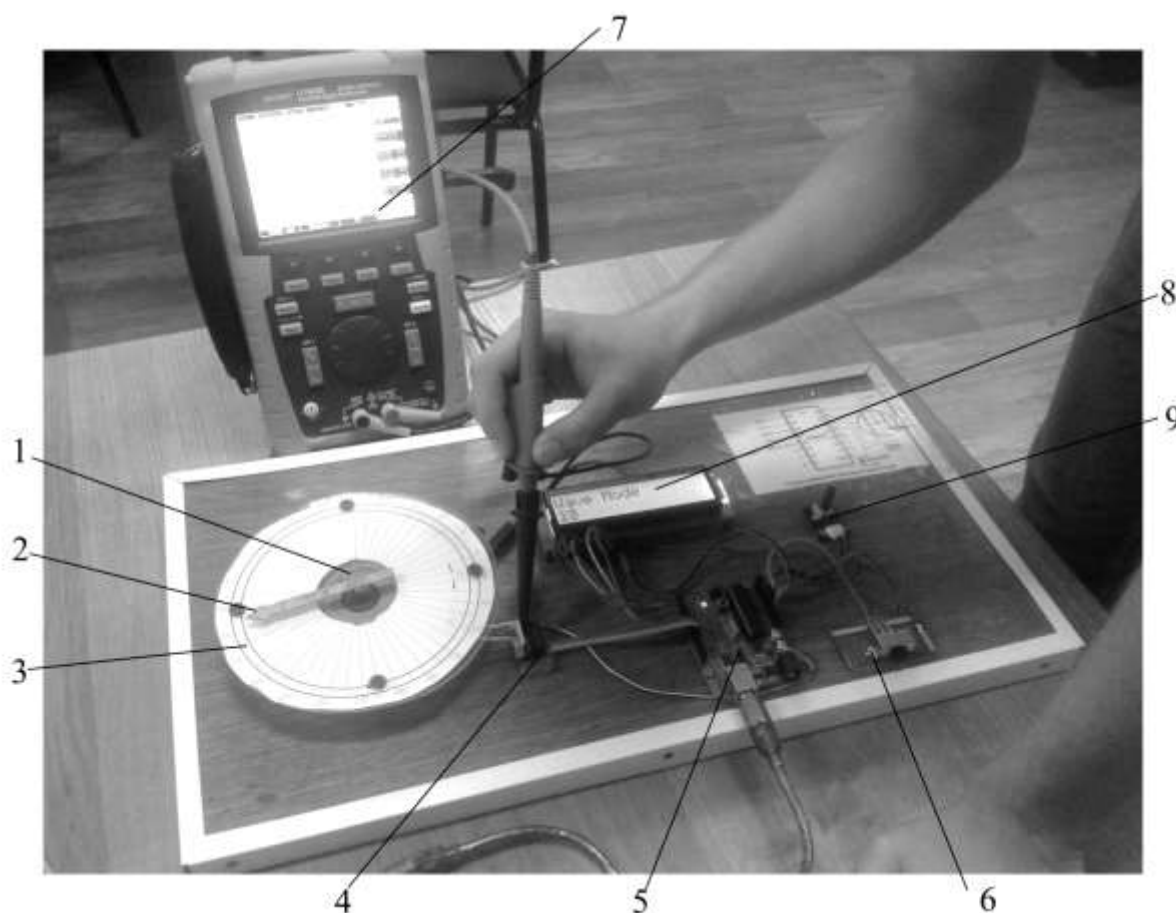


Рис. 7. Внешний вид стенда в процессе измерений

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.

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

### **Библиографический список**

1. Беспалов В.Я. Электрические машины: учебник. М. Академия, 2013.
2. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. М.: Издательский центр “Академия”, 2004.
3. Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1998.
4. Москаленко В.В. Системы автоматизированного управления электропривода. М.: Инфра-м, 2004.
5. А. В. Емельянов, А. Н. Шилин «Шаговые двигатели» учебное пособие, Волгоград, 2005 г.
6. [www.stepmotor.ru](http://www.stepmotor.ru)

### **Список оборудования**

«Лабораторный стенд "Мехатронный привод на базе шагового электродвигателя"», Блок питания GPD-73303D, Осциллограф-мультиметр Agilent technologies (США) U1602 В.