

Всероссийский конкурс исследовательских и проектных работ  
школьников **“Высший пилотаж”**

## **НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА**

Направление **“Физика”**

### **“ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК”**

Автор: Литвинов Владислав

Андреевич,

ученик 11 **“Г”** класса

Руководитель: Дьяченкова Людмила

Андреевна, учитель физики

МБОУ гимназия им. академика Н.Г.Басова

г. Воронеж

2021 – 2023 учебный год

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	<b>4</b>
<b>АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ</b>	<b>5</b>
<b>ЭТАПЫ РАБОТЫ</b>	<b>5</b>
<b>ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ</b>	<b>6</b>
<b>ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ</b>	<b>11</b>
<b>ВЫВОДЫ</b>	<b>22</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b>	<b>23</b>

# ПАСПОРТ ПРОЕКТНОЙ РАБОТЫ

*Название проекта:* Исследование принципа работы шагового двигателя и его характеристик.

*Автор:* Литвинов Владислав Андреевич, обучающийся 11 «Г» класса

*Научный руководитель:* Дьяченкова Людмила Андреевна, учитель физики

*Цели и задачи проекта:* Исследовать принцип работы, устройство шагового двигателя и его характеристики, собрать при этом рабочую модель прибора, проведя соответствующие гипотезам опыты и сделав из их результатов выводы.

*Результат проекта:* Исследовали принцип работы, устройство шагового двигателя и его характеристики, собрали рабочую модель синхронного бесщеточного электродвигателя, подтвердили/опровергли гипотезы, сделали выводы.

*Объект исследования:* шаговый двигатель.

# ВВЕДЕНИЕ

Уже долгое время люди стремятся к достижению всеобщей автоматизации с целью освобождения человека от участия в технологических процессах, направленных на получение, преобразование и передачу энергии, материалов, изделий или информации. Для этого ведутся разработки новых типов двигателей.

Первый прообраз шагового двигателя появился в 1830-х годах и представлял собой электромагнит, приводящий в движение храповое колесо. Первоначально предполагалось использовать шаговые двигатели в сфере телефонии, а именно для обеспечения работы систем синхронной связи постоянного тока.

На сегодняшний момент ШД активно применяются в робототехнике, на производстве в автоматизированных ЧПУ станках и прочих сферах промышленности, предполагающих под собой необходимость высокой точности позиционирования и повторяемости перемещений. Актуализация использования ШД достигается благодаря их дешевизне и неприхотливости в эксплуатации. Именно поэтому, данная тема проекта была выбрана мной для исследования.

# АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Шаговый двигатель (ШД) является одним из наиболее эффективных и перспективных видов электрических машин, которые имеют ряд преимуществ над другими видами двигателей. Данная тема исследования актуальна для меня потому, что рассматриваемые принципы проектирования и конструирования шаговых двигателей активно применяются и в остальных сферах техники, благодаря чему в ходе выполнения исследовательской работы я получу практические и теоретические навыки, которые в итоге смогу использовать в своих последующих научных работах.

## ЭТАПЫ РАБОТЫ

- изучить теоретический материал;
- сформулировать цели и задачи;
- сформулировать гипотезы;
- сформулировать гипотезы;
- провести опыты и измерения;
- занести полученные данные в таблицы;
- произвести расчёты;
- сделать выводы.

# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## Определение ШД:

Шаговый электродвигатель (ШД) — это одна из разновидностей двигателей постоянного тока. Основной конструктивной особенностью, отличающей данный тип электрических машин от прочих, является возможность осуществления прерывистого вращения с шагом в фиксированный градус, благодаря чему становится возможным позиционирование ротора с точностью до долей градуса.

## Принцип работы:

Любой электрический двигатель вращающего принципа действия, в частности шаговый двигатель, имеет в основе своей конструкции два основных элемента: ротор и статор. (рис. 1)

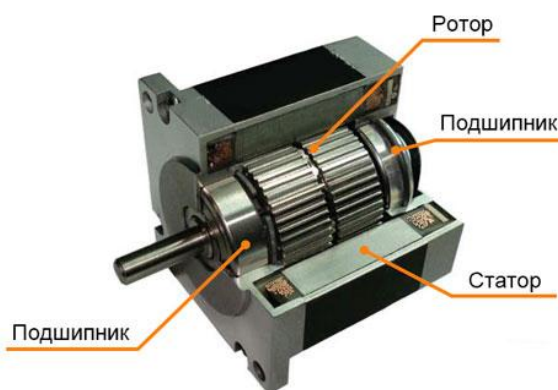


рис. 1

Принцип работы большинства шаговых двигателей состоит в том, что при попарной подаче тока в противоположные обмотки происходит подтягивание разноименных полюсов ротора, расположенных за зубьями статора и отталкивание одноименных, идущих перед ними по ходу вращения. То есть, электромагниты, состоящие из обмотки и ферромагнитного сердечника,

расположенные радиально относительно оси ротора, поочередно включаются в работу, создавая магнитное поле вокруг себя, которое в свою очередь воздействует на ротор двигателя, приводя его в движение (рис. 2)

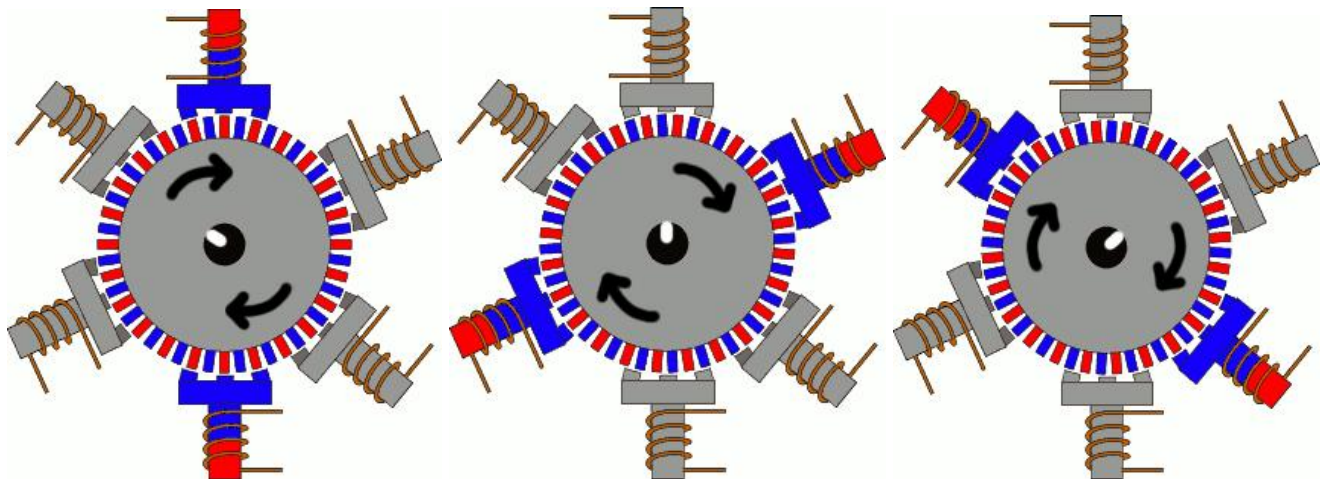


рис. 2

Положения ротора электродвигателя, в которых происходит подача тока в противоположные обмотки, называются шагами или фазами шагового двигателя. Шаговые двигатели могут именоваться по количеству шагов, происходящих за полный оборот ротора на 360 градусов. В данной работе будет рассмотрен пример шагового двигателя, имеющего в своей конструкции 6 постоянных магнитов и 4 электромагнита, при вращении ротора которого происходит 12 попарных подач тока на электромагниты.

### **Управление шаговым двигателем:**

Для того, чтобы шаговый двигатель мог функционировать, необходимо, чтобы смена полюсов и включение/выключение противоположных обмоток статора были синхронизированы между собой, то есть необходимо в момент смены фазы шагового двигателя поменять направление движения тока в электромагните,

изменив его полярность. Для этого используются контроллеры шаговых двигателей, которые могут менять направление движения тока через равные промежутки времени.

### **Виды шаговых двигателей:**

По типу ротора, шаговые двигатели делятся на 3 типа: двигатели с постоянными магнитами, реактивные двигатели и гибридные двигатели.

В гибридном шаговом двигателе 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.

Реактивный шаговый двигатель не оснащается магнитами на роторе, однако его ротор выполнен из магнитомягких сплавов, то есть материалов, которые быстро намагничиваются и быстро теряют свои магнитные свойства, обладая большой магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой, в результате намагничивания которого и происходит вращение. Конструкция в поперечном разрезе напоминает шестерню с зубцами. Полюса статорных обмоток запитываются противоположными парами и создают магнитную силу для перемещения ротора, который двигается от попеременного протекания электрического тока в обмоточных парах.

Шаговый двигатель с постоянным магнитом - шаговый двигатель, ротор которого выполнен из 2-х или более постоянных магнитов, расположенных полюсами поочередно. Именно данный тип двигателя будет рассмотрен в работе и сконструирован по её завершению.



## Расчетные формулы характеристик двигателя:

Скорость, с которой контроллер двигателя способен приводить ротор в движение до падения крутящего момента напрямую зависит от индуктивности катушек электромагнитов, установленных на статоре, поскольку именно она определяет силу электромагнитного взаимодействия между ротором и статором.

$U$  - напряжение на контактах электромагнитов

$n$  - число шагов на оборот

$L$  - индуктивность

$I$  - сила тока

$\nu$  (**ню**) - число оборотов в секунду

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{N}{t} = \frac{2 * U}{n * \pi * L * I}$$

$$\nu = \frac{2 * U}{n * \pi * L * I} \quad (*)$$

$$L = \mu * \mu_0 * \frac{N^2 * S}{l}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{полезная}}}{P_{\text{затраченная}}} * 100\% = \frac{I * U}{I * \varepsilon} * 100\% = \frac{R}{R + r} * 100\%$$

$$\eta = \frac{R}{R + r} * 100\% \quad (**)$$

$\mu_0$  - магнитная постоянная ( $4\pi * 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ )

$N$  - число витков катушки

$S$  - площадь поперечного сечения катушки

$l$  - длина катушки

# ГИПОТЕЗЫ

Исходя из расчетных формул для характеристик шагового двигателя можно составить следующие гипотезы:

1. При увеличении числа шагов на оборот, будет увеличиваться число об/сек.
2. При увеличении напряжения на электромагнитах, будет увеличиваться число об/сек.
3. При увеличении сопротивления в цепи, будет увеличиваться число об/сек.

# ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## Этап проектирования:

Для сборки модели шагового двигателя необходимо было изготовить:

- статор, состоящий из 4 электромагнитов, закрепленных на алюминиевой рамке.
- ротор, состоящий из 6 постоянных магнитов, расположенных по сторонам правильного шестиугольника.
- контроллер шагового двигателя на базе микроконтроллера arduino, а также драйвера шагового двигателя L298N (\*)

(\*) Драйвер L298N - полный H-мост, те электронная схема, которая дает возможность приложить напряжение к нагрузке в разных направлениях. Используется для многофункционального управления двигателями постоянного тока, имеет возможность изменять скорость и направление вращения моторов. Для управления используются командные входы, представляющие собой штыревые контакты. Внешний вид модуля представлен на рис 1.

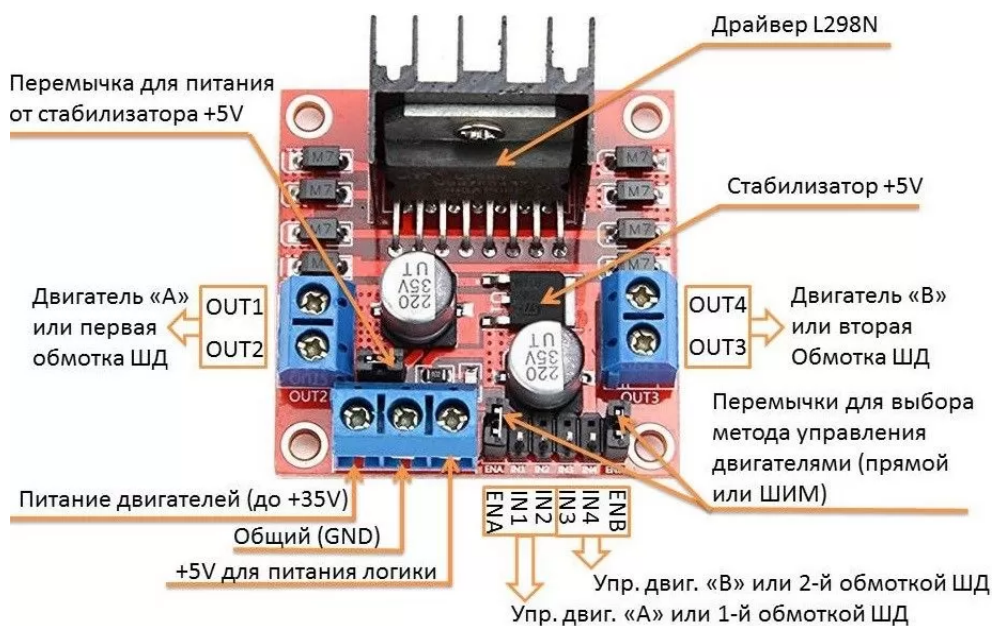


рис. 1

### Сборка рабочей модели двигателя:

На фанере зафиксирована алюминиевая рамка 24 см \* 16 см, состоящая из метрового алюминиевого профиля, распиленного на части длиной 6 см, 16 см, 24 см, по 2 каждая. (рис. 1)

4 электромагнита постоянного тока состоят из сердечника, выполненного из стального болта, длиной 3 см и диаметром 1 см. В качестве обмотки использована медная проволока, диаметром 0.335 мм, длиной 310м. Для расчета количества витков медной проволоки на 1 сердечник, были взяты исходный диаметр сердечника (1см) и необходимый диаметр с учетом обмотки ( $\approx 2$ см), взято среднее арифметическое этих значений:

$d' = 1.5$  см. Длина окружности сердечника при  $d'$  будет равна:  $c = \pi * d' \approx 4.71$  см. Из этих данных было получено, что на одну катушку будет необходимо намотать ( $310\text{м} / 4$ ) /  $0.0471\text{м} \approx 1645$  витков проволоки. (рис2)

Однако, несмотря на заранее известную общую длину проволоки, использованной при намотке катушек, необходимо было наверняка узнать, было ли намотано необходимое количество витков на каждую катушку. Для этого, при помощи мультиметра через катушку был пропущен пробный заряд, в результате чего было измерено сопротивление. Исходя из полученных данных и формулы для сопротивления провода получим:

$$R = \frac{\rho * l}{S} = \frac{\rho * n * 2\pi * r}{S} \Rightarrow n = \frac{R * S}{\rho * 2\pi * r}$$

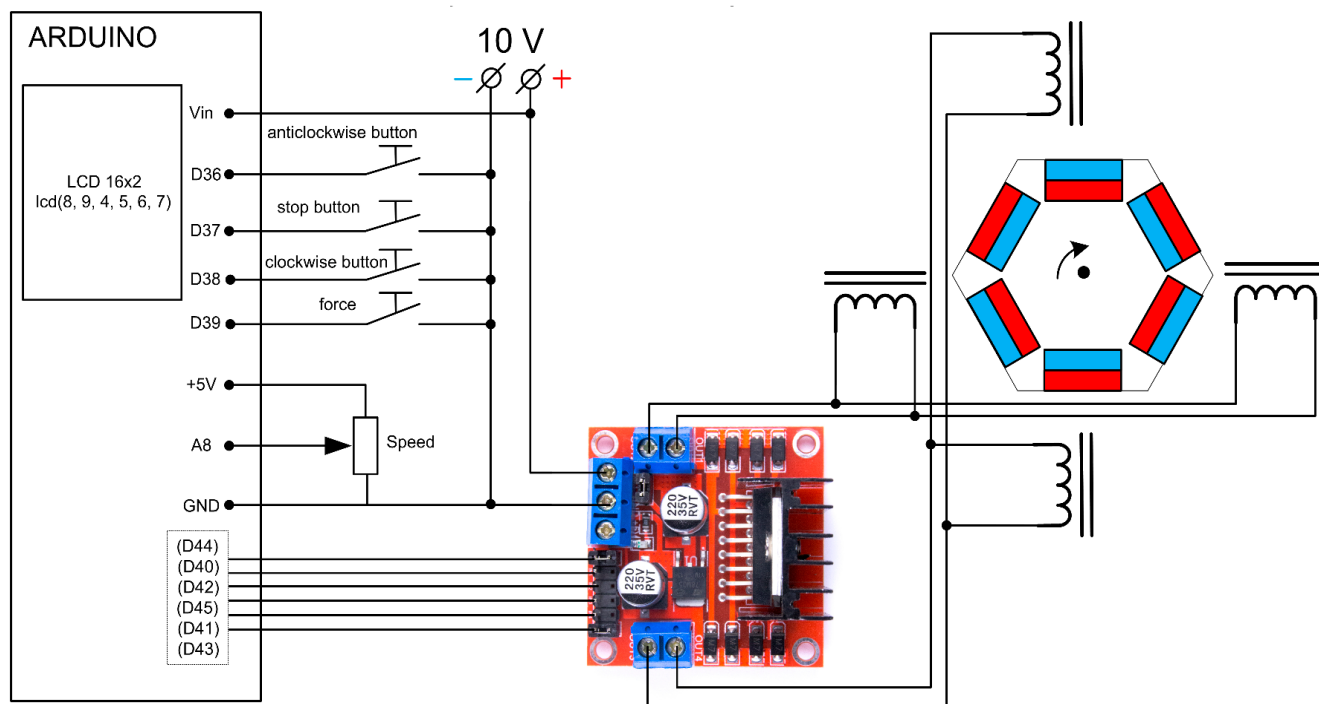
$$n = \frac{12 \text{ Ом}}{0,174 \frac{\text{Ом}}{\text{м}} * \pi * 0,015\text{м}} \approx 1650$$

Электромагниты зафиксированы на рамке так, чтобы в ходе опыта №3 была возможность перемещать их по ней, изменяя расстояние от края магнита до края ротора.

Собран ротор шагового двигателя, состоящий из 6 постоянных магнитов 1 см \* 1 см \* 0.3 см, расположенных полюсами поочередно. Ротор свободно вращается на оси. (рис. 3)

Собран контроллер шагового двигателя, состоящий из микроконтроллера arduino и драйвера шагового двигателя L298N. В микроконтроллер была загружена прошивка, необходимая для управления фазами двигателя (фрагмент представлен на слайде), для подачи нужных сигналов на процессор в цепи имеется 4 кнопки и резистор переменного сопротивления (потенциометр). (рис. 4-5)

### Схема электрической цепи электродвигателя:



## Фрагменты из управляющей программы:

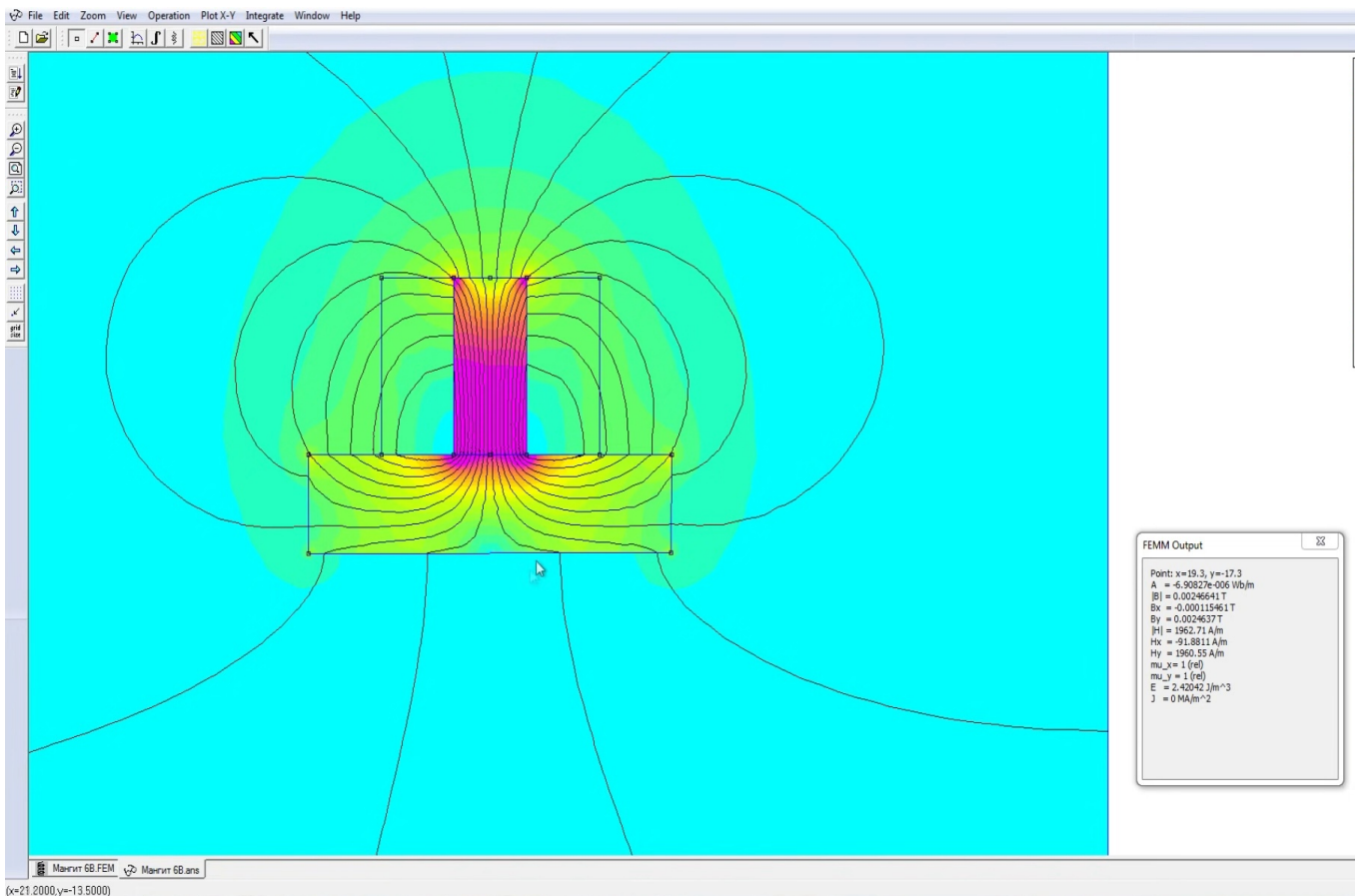
```
int ALLPosit[13];

void setup() {

ALLPosit[0] = B00000000; // -
ALLPosit[1] = B11000000; // 30
ALLPosit[2] = B00011000; // 60
ALLPosit[3] = B10100000; // 90
ALLPosit[4] = B00010100; // 120
ALLPosit[5] = B11000000; // 150
ALLPosit[6] = B00011000; // 180
ALLPosit[7] = B10100000; // 210
ALLPosit[8] = B00010100; // 240
ALLPosit[9] = B11000000; // 270
ALLPosit[10] = B00011000; // 300
ALLPosit[11] = B10100000; // 330
ALLPosit[12] = B00010100; // 360

if (ItervSpeed != 0) {
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(CurrSpeed);
  lcd.print("ob/min ");
  lcd.print(ItervSpeed);
  lcd.print("mS");
  lcd.setCursor(4, 0);
  lcd.print(ACW_STATE);
  lcd.print(STP_STATE);
  lcd.print(CCW_STATE);
  lcd.print(" M");
  lcd.print(MAXSPEED);
  lcd.setCursor(15, 0);
  lcd.print(FRC_STATE);
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print(CurrPosit*30);
  if (ACW_STATE || CCW_STATE) delay(ItervSpeed);
  } else superFRC();
}
```

## Результаты моделирования работы электромагнита:



Фотографии:

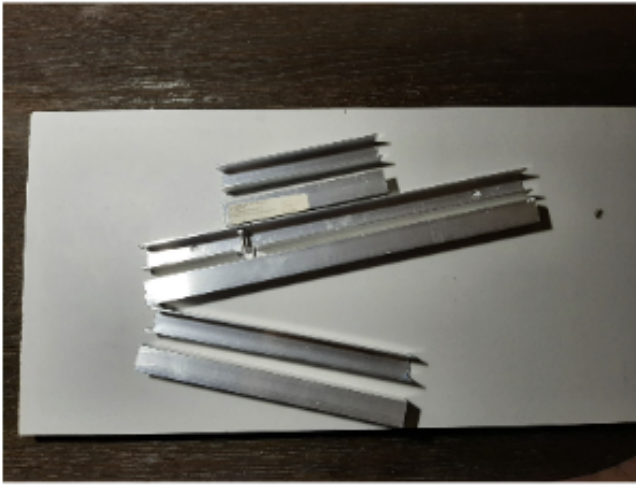


рис. 1

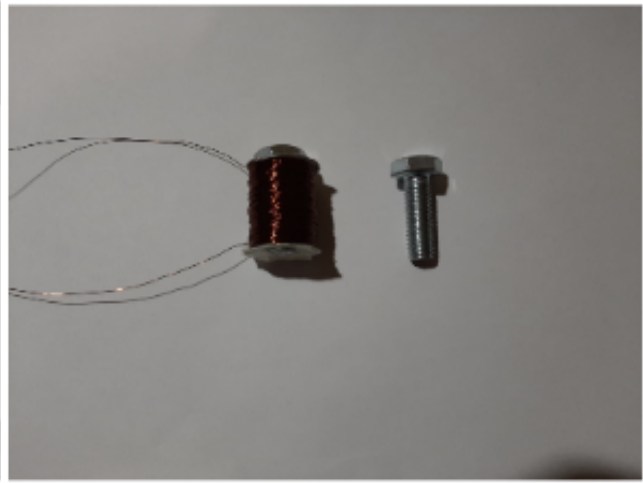


рис. 2



рис. 3

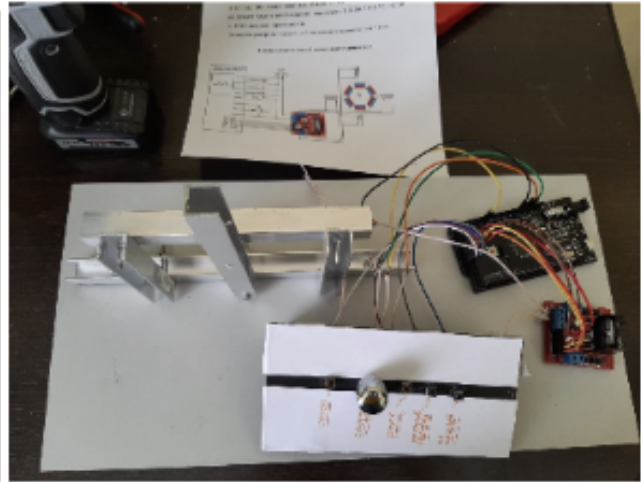


рис. 4

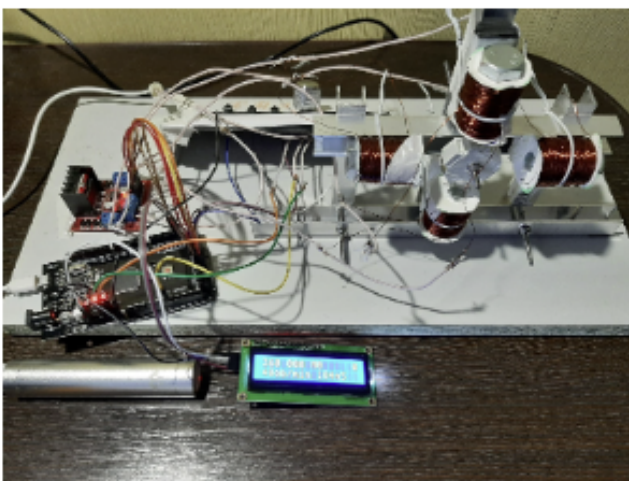


рис. 5

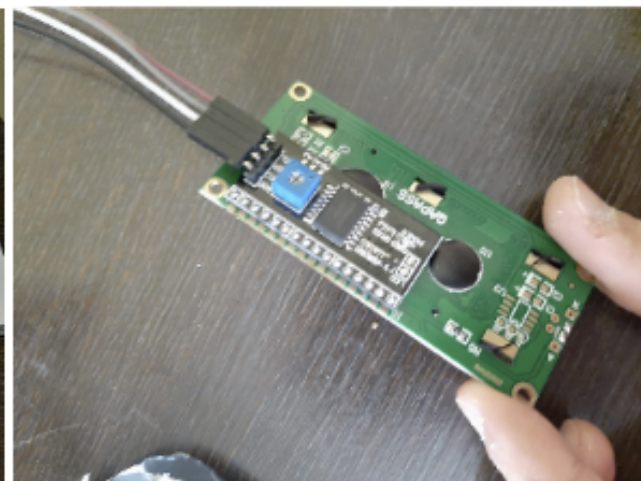


рис. 6

### Проведение опытов:

Для проверки всех гипотез, в ходе проведения опытов, необходимо измерить количество оборотов в секунду ротора шагового двигателя. В промышленных условиях для этого используют специальный прибор, тахометр, однако в моем случае текущее значение оборотов в секунду будет выводиться на lcd экран, подключенный к микроконтроллеру (рис.6).

**Гипотеза 1** проверяет зависимость количества об/сек от количества шагов на оборот. В случае собранного мной двигателя, добиться изменения количества шагов на оборот можно попарным отключением противоположных обмоток статора.

В результате мы получим 3 опыта, в которых будут задействованы двигатели с 4 электромагнитами (12 шагов), с 2 электромагнитами (6 шагов) и с 1 электромагнитом.

### Измерительная таблица:

Опыт	Шагов на оборот n, ед.	Напряжение U, В	Сила тока I, А	Количество витков, ед.	Длина катушки, м	Индуктивность L, мГн	Оборотов в секунду v, об/мин	Показания об/мин
№1	12	10	3.63	1650	0.03	3.58	128.3	142
№2	6	10	3.63	1650	0.03	3.58	256.5	250
№3	1	10	3.63	1650	0.03	3.58	0	-



Расчеты:

$$L_1 = L_2 = L_3 = \mu * \mu_0 * \frac{N^2 * S}{l} = 1.26 * 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} * \frac{1650^2 * 3.14 \text{ м}^2 * 10^{-4}}{0.03 \text{ м}} \approx 3.58 \text{ мГн}$$

$$v_1 = \frac{2 * U}{n * \pi * L * I} = \frac{2 * 10 \text{ В}}{12 * 3.14 * 3.58 \text{ Гн} * 10^{-3} * 3.63 \text{ А}} = 128.3 \text{ об/мин}$$

$$v_2 = \frac{2 * U}{n * \pi * L * I} = \frac{2 * 10 \text{ В}}{6 * 3.14 * 3.58 \text{ Гн} * 10^{-3} * 3.63 \text{ А}} = 256.5 \text{ об/мин}$$

$$v_3 = 0 \text{ об/с}$$

Значение оборотов в секунду для 3 опыта равно 0, потому что при пуске двигателя с 1 электромагнитом, не имеющего специальных пусковых приспособлений, результирующий момент сил будет равен нулю, и двигатель не сможет начать вращаться. Однако, если ротор привести во вращение в ту или иную сторону, то один из моментов будет преобладать и вал двигателя будет продолжать вращаться в сторону начального вращения

**Вывод:** чем большее количество шагов смен полярностей противоположных обмоток статора происходит за один оборот, тем меньшее количество оборотов в секунду будет достигаться. При этом, у двигателя с количеством шагов, равным одному, будет отсутствовать обратная связь, поэтому вращения происходить не будет.

Для проверки гипотезы №2 необходимо измерить в каждом опыте напряжение на контактах электромагнитов двигателя, при этом изменяя его в разных опытах. Для этого будет использоваться мультиметр в режиме работы вольтметра и резистор переменного сопротивления, включенный в цепь последовательно.

**Гипотеза 2** проверяет зависимость количества об/сек от напряжения на контактах электромагнитов. Для изменения напряжения на клеммах, буду использовать резистор переменного сопротивления, при этом по закону Ома для полной цепи, при увеличении сопротивления будет увеличиваться напряжение, при уменьшении сопротивления будет уменьшаться напряжение.

Проведено 8 опытов, результаты измерений и расчетов занесены в таблицу:

Измерительная таблица:

Опыт	Шагов на оборот n, ед.	Напряжение U, В	Сила тока I, А	Количество витков, ед.	Длина катушки, м	Индуктивность L, мГн	Оборотов в секунду v, об/мин	Показания об/мин
№1	12	15.758	2	1650	0.03	3.58	233.6	232
№2	12	16.235	2	1650	0.03	3.58	240.7	244
№3	12	17.512	2	1650	0.03	3.58	259.6	250
№4	12	17.188	2	1650	0.03	3.58	254.8	248
№5	12	12.124	2	1650	0.03	3.58	179.8	174
№6	12	13.1	2	1650	0.03	3.58	194.2	197
№7	12	14.921	2	1650	0.03	3.58	221.2	225
№8	12	15.33	2	1650	0.03	3.58	227.2	230

## Расчеты:

$$L_1 = L_2 = L_3 = \mu * \mu_0 * \frac{N^2 * S}{l} = 1.26 * 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} * \frac{1650^2 * 3.14 \text{ м}^2 * 10^{-4}}{0.03 \text{ м}} \approx 3.58 \text{ мГн}$$

$$v_1 = \frac{2 * U}{n * \pi * L * I} = \frac{2 * 15.758 \text{ В}}{12 * 3.14 * 3.58 \text{ Гн} * 10^{-3} * 2 \text{ А}} = 233.6 \text{ об/мин}$$

$$v_2 = \frac{2 * U}{n * \pi * L * I} = \frac{2 * 16.235 \text{ В}}{12 * 3.14 * 3.58 \text{ Гн} * 10^{-3} * 2 \text{ А}} = 240.7 \text{ об/мин}$$

$$v_3 = \frac{2 * U}{n * \pi * L * I} = \frac{2 * 17.512 \text{ В}}{12 * 3.14 * 3.58 \text{ Гн} * 10^{-3} * 2 \text{ А}} = 259.6 \text{ об/мин}$$

$$v_4 = \frac{2 * U}{n * \pi * L * I} = \frac{2 * 17.188 \text{ В}}{12 * 3.14 * 3.58 \text{ Гн} * 10^{-3} * 2 \text{ А}} = 254.8 \text{ об/мин}$$

$$v_5 = \frac{2 * U}{n * \pi * L * I} = \frac{2 * 12.124 \text{ В}}{12 * 3.14 * 3.58 \text{ Гн} * 10^{-3} * 2 \text{ А}} = 179.8 \text{ об/мин}$$

$$v_6 = \frac{2 * U}{n * \pi * L * I} = \frac{2 * 13.1 \text{ В}}{12 * 3.14 * 3.58 \text{ Гн} * 10^{-3} * 2 \text{ А}} = 194.2 \text{ об/мин}$$

$$v_7 = \frac{2 * U}{n * \pi * L * I} = \frac{2 * 14.921 \text{ В}}{12 * 3.14 * 3.58 \text{ Гн} * 10^{-3} * 2 \text{ А}} = 221.2 \text{ об/мин}$$

$$v_8 = \frac{2 * U}{n * \pi * L * I} = \frac{2 * 15.33 \text{ В}}{12 * 3.14 * 3.58 \text{ Гн} * 10^{-3} * 2 \text{ А}} = 227.2 \text{ об/мин}$$

**Вывод:** Напряжение на контактах электромагнитов двигателя влияет на скорость, с которой драйвер шагового двигателя может приводить двигатель в действие. Чем большее напряжение имеют контакты обмоток статора, тем большее количество оборотов в секунду будет достигаться.

Тк на потенциометре нет делений для задания точного значения сопротивления, то для проверки гипотезы №3 необходимо вычислить в каждом опыте силу тока и сопротивление цепи, значения которых будут различны для каждого опыта. Для изменения общего сопротивления в цепи будет последовательно включаться резистор переменного сопротивления.

### Измерительная таблица:

Опыт	Шагов на оборот n, ед.	Сопротивление потенциометра R', Ом	Сила тока I, А	Количество витков, ед.	Длина катушки, м	Индуктивность L, мГн	Оборотов в секунду v, об/мин	Показания об/мин
№1	12	13.1	0.63	1650	0.03	3.58	233.6	232
№2	12	13.6	0.61	1650	0.03	3.58	240.7	244
№3	12	14.8	0.57	1650	0.03	3.58	259.6	250
№4	12	14.5	0.58	1650	0.03	3.58	254.8	248
№5	12	9.4	0.82	1650	0.03	3.58	179.8	174
№6	12	10.4	0.76	1650	0.03	3.58	194.2	197
№7	12	12.1	0.67	1650	0.03	3.58	221.2	225
№8	12	12.6	0.65	1650	0.03	3.58	227.2	230

#### Расчеты:

$$L = \mu * \mu_0 * \frac{N^2 * S}{l} = 1.26 * 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} * \frac{1650^2 * 3.14 \text{ м}^2 * 10^{-4}}{0.03 \text{ м}} \approx 3.58 \text{ мГн}$$

$$R_0 = R_{\text{катушек}} + R' = \frac{R_1 * R_2 * R_3 * R_4}{R_1 * R_2 * R_3 + R_4 * R_2 * R_3 + R_1 * R_2 * R_4 + R_1 * R_3 * R_4} + R'$$

$$I_1 = \frac{U}{R_0 + R'} = \frac{10\text{В}}{2,750\text{м} + 13,10\text{м}} = 0.63\text{А}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_0 + R'} = \frac{10\text{В}}{2,750\text{м} + 13,60\text{м}} = 0.61\text{А}$$

$$I_3 = \frac{U}{R_0 + R'} = \frac{10\text{В}}{2,750\text{м} + 14,80\text{м}} = 0.57\text{А}$$

$$I_4 = \frac{U}{R_0 + R'} = \frac{10\text{В}}{2,750\text{м} + 14,50\text{м}} = 0.58\text{А}$$

$$I_5 = \frac{U}{R_0 + R'} = \frac{10\text{В}}{2,750\text{М} + 9,40\text{М}} = 0.82\text{А}$$

$$I_6 = \frac{U}{R_0 + R'} = \frac{10\text{В}}{2,750\text{М} + 10,40\text{М}} = 0.76\text{А}$$

$$I_7 = \frac{U}{R_0 + R'} = \frac{10\text{В}}{2,750\text{М} + 12,10\text{М}} = 0.67\text{А}$$

$$I_8 = \frac{U}{R_0 + R'} = \frac{10\text{В}}{2,750\text{М} + 12,60\text{М}} = 0.65\text{А}$$

$$v_1 = \frac{2 * U}{n * \pi * L * I} = \frac{2 * 10\text{В}}{12 * 3.14 * 3.58\text{Гн} * 10^{-3} * 0.63\text{А}} = 233.6 \text{ об/мин}$$

$$v_2 = \frac{2 * U}{n * \pi * L * I} = \frac{2 * 10\text{В}}{12 * 3.14 * 3.58\text{Гн} * 10^{-3} * 0.61\text{А}} = 240.7 \text{ об/мин}$$

$$v_3 = \frac{2 * U}{n * \pi * L * I} = \frac{2 * 10\text{В}}{12 * 3.14 * 3.58\text{Гн} * 10^{-3} * 0.57\text{А}} = 259.6 \text{ об/мин}$$

$$v_4 = \frac{2 * U}{n * \pi * L * I} = \frac{2 * 10\text{В}}{12 * 3.14 * 3.58\text{Гн} * 10^{-3} * 0.58\text{А}} = 254.8 \text{ об/мин}$$

$$v_5 = \frac{2 * U}{n * \pi * L * I} = \frac{2 * 10\text{В}}{12 * 3.14 * 3.58\text{Гн} * 10^{-3} * 0.82\text{А}} = 179.8 \text{ об/мин}$$

$$v_6 = \frac{2 * U}{n * \pi * L * I} = \frac{2 * 10\text{В}}{12 * 3.14 * 3.58\text{Гн} * 10^{-3} * 0.76\text{А}} = 194.2 \text{ об/мин}$$

$$v_7 = \frac{2 * U}{n * \pi * L * I} = \frac{2 * 10\text{В}}{12 * 3.14 * 3.58\text{Гн} * 10^{-3} * 0.67\text{А}} = 221.2 \text{ об/мин}$$

$$v_8 = \frac{2 * U}{n * \pi * L * I} = \frac{2 * 10\text{В}}{12 * 3.14 * 3.58\text{Гн} * 10^{-3} * 0.65\text{А}} = 227.2 \text{ об/мин}$$

**Вывод:** Сопротивление в цепи влияет на скорость, с которой драйвер шагового двигателя может приводить двигатель в действие. Чем большее сопротивление в цепи, тем большее количество оборотов в секунду будет достигаться.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Гипотеза №1 опроверглась. При увеличении числа шагов на оборот, будет уменьшаться число оборотов в секунду, что мы подтвердили результатами, полученными в опытах к первому эксперименту.
- Гипотеза №2 подтвердилась. При увеличении напряжения, будет увеличиваться число оборотов в секунду.
- Гипотеза №3 подтвердилась. При увеличении сопротивления в цепи, число об/сек будет увеличиваться.

**Вывод:** исследовали принцип работы, устройство шагового двигателя и его характеристики, сформулировали гипотезы о характеристиках двигателя, собрали рабочую модель синхронного бесщеточного электродвигателя, провели качественные и количественные опыты, систематизировали результаты, подтвердили/опровергли поставленные гипотезы, подвели итоги.

В ходе выполнения исследовательской работы я получил практические навыки в сфере техники, а именно:

- Научился проектировать сложные технические устройства (разработка схем электрической цепи устройства и программного обеспечения, моделирование работы устройства с использованием современных технологий)
- Научился паять схемы, включающие в себя микроэлектронные компоненты (управляющие драйвера, микроконтроллеры)
- Научился подбирать материалы, необходимые для создания сложных технических устройств (шагового двигателя)

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Научное пособие “Шаговые двигатели”, А. В. Емельянов, А. Н. Шилин (издательство “Федеральное агентство образования ВГТУ”, Волгоград, 2005 г.)

Статья №10 “Шаговые двигатели и особенности их применения”

А.В Рентюк (издательство “Компоненты и технологии”, Санкт-Петербург, 2013 г.)

Такаши К. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления. Пер. с англ. (издательство “Энергоатомиздат”, Москва, 1987 г.)

Бакалаврская работа “Исследование способов управления шаговым двигателем” НИ ТПУ, П.В Авдеенок (Томск, 2017 г.)

Учебник “Физика: Для средних специальных учебных заведений”

Л.С. Жданов, Г.Л. Жданов (Москва, 2013 г.)

“Элементарный учебник физики” под редакцией академика Г.С. Ландсберга том II “Электричество и магнетизм”. Издание восьмое, стереотипное. Издательство ‘Наука’. Главная редакция Физико-математической литературы, Москва 1973.

Физика. 11 класс : учеб. Для общеобразоват. организаций : углубл. Уровень / [О.Ф. Кабардин и др.] ; под редакцией А.А. Пинского, О.Ф. Кабардина. – 5-е издание.

