

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

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»
(наименование)

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки / специальности)

Интеллектуальные энергетические системы
(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему «Узел однокоординатного перемещения объекта на основе микроконтроллера»

Обучающийся

Н.И. Сибиров

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

А.К. Кудинов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультант

к.т.н., доцент М.М. Бажутина

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2022

Аннотация

Выпускная квалификационная работа посвящена вопросам выбора электротехнических устройств для формирования узла однокоординатного перемещения. Работа содержит описание принципа действия шаговых и вентильных двигателей, обзор их основных типов, описание драйверов и контроллеров шаговых и вентильных двигателей.

В первом разделе произведен обзор состояния вопроса по ситуации вокруг шаговых и вентильных двигателей.

Во втором разделе разобран принцип действия шаговых двигателей, ассортимент шаговых двигателей, драйверов и контроллеров для их питания и управления.

В третьем разделе разобран принцип действия вентильных двигателей, ассортимент вентильных двигателей, драйверов и контроллеров для их питания и управления.

В четвертом разделе сформулированы задачи бакалаврской работы.

В пятом разделе составлены приводные узлы на основе шаговых двигателей и их драйверов для трех значений мощностей двигателей. Составлены схемы соединений между двигателем, драйвером и варианты подключения к микроконтроллерам и программируемым логическим контроллерам (ПЛК).

В шестом разделе составлены приводные узлы на основе вентильных двигателей и их драйверов для трех значений мощностей двигателей. Составлены схемы соединений между двигателем, драйвером и варианты подключения к микроконтроллерам и программируемым логическим контроллерам (ПЛК).

Выполнено 6 чертежей на формате А1. Объем работы 68 листов.

ABSTRACT

The title of the graduation paper is «A single-coordinate object movement node based on a microcontroller».

This thesis is devoted to the study of possible variations of engines and related equipment, as well as the economic component of the issue in the modern market.

The thesis consists of an explanatory note, an introduction, including figures, tables, a list of references, including foreign sources and applications, and a graphic part on 6 sheets of A1 format

The purpose of this work is a point analysis of the equipment market for the presence and prevalence of motors in the power range from 100W to 900W, as well as the construction of connection diagrams for stepper and valve motors, their drivers and controllers, represented by two types: microcontrollers, and PLCs (programmable logic controllers).

The first part of the final work describes the designs, principles of operation, the main range of stepper and valve motors with a power of 100-900W.

In the second part of the work, an analysis is made on the issue under consideration. The availability, assortment, prevalence, economic indicators and possible configurations necessary for servicing 3D printers are considered.

In conclusion we'd like to stress that the materials of this thesis are relevant due to the increasing demand for alternative methods of creating products, and will be of interest to individuals and companies interested in integrating 3D printer technology into their production.

Содержание

Введение	6
1 Состояние вопроса	7
1.1 Шаговые двигатели	8
1.1.1 Конструкция и принцип действия шаговых двигателей	8
1.1.2 Ассортимент шаговых двигателей на мощности от 100 до 900 Вт	17
1.1.3 Драйверы для питания обмоток шаговых двигателей	19
1.1.4 Контроллеры управления шаговыми двигателями и их возможности	24
1.2 Вентильные двигатели	27
1.2.1 Конструкция и принцип действия вентильных двигателей	27
1.2.2 Ассортимент вентильных двигателей на мощности от 100 до 900 Вт	33
1.2.3 Драйверы для питания обмоток вентильных двигателей	36
1.2.4 Контроллеры управления вентильными двигателями и их возможности	37
1.3 Задачи бакалаврской работы	43
2 Приводные узлы на основе шаговых двигателей	44
2.1 Узел с номинальной мощностью двигателя около 100Вт.	44
2.1.1 Узел с номинальной мощностью двигателя около 500Вт.	49
2.1.2 Узел с номинальной мощностью двигателя около 1000Вт.	55
2.2 Приводные узлы на основе вентильных двигателей	61
Заключение	68
Список используемой литературы	70

Введение

В настоящее время при изготовлении ограниченных, единичных тиражей изделий из пластмасс используют аддитивные технологии, которые основываются на работе 3D-принтеров. Так называемая 3D-печать находит всё большее распространение при изготовлении крупногабаритных деталей, в медицине, строительстве и во многих других сферах.

Печать деталей больших габаритов и объемов влечет за собой затраты большого количества времени, материалов и электроэнергии.

Большое число конструкторов разрабатывает собственные уникальные 3D-принтеры для печати крупногабаритных деталей и изделий из пластмасс для личного и коммерческого использования. Основная цель создания таких принтеров – получение особых режимов печати, зачастую недоступных на серийных образцах 3D-принтеров. Например, к таким режимам относят повышенную температуру внутри камеры печати, позволяющую повысить скорость печати, снизить степень деформаций и, как следствие, разрушение изделий на этапе печати и охлаждения образцов. Кроме этого, практикуют повышение давления, эксперименты с нестандартными, или вновь разрабатываемыми типами пластиков. Решение таких задач вызывает необходимость в подборе устройств и узлов, обеспечивающих движение печатающей головки по различным осям. При этом в одном 3D-принтере возможно сочетание различных, оптимальных для конкретных массогабаритных показателей печатающей головки, печатного стола мощностных показателей электродвигателей, драйверов их питающих и контроллеров, управляющих ими.

Соответственно, актуальным становится вопрос подбора согласованных между собой по параметрам двигателей, драйверов и источников их питания для ряда значений мощностей в некотором диапазоне для нужд в той или иной сфере.

1 Состояние вопроса

На сегодняшний день в приложениях, где требуется точное позиционирование и скоростное перемещение объекта находят два основных типа двигателей: шаговые и вентильные, называемые также бесколлекторными или, в англоязычной аббревиатуре – BLDC. Эти двигатели не могут питаться непосредственно от какого-либо источника энергии. Для организации питания и отчасти управления ими используют электронные устройства, называемые драйверами.

Они формируют напряжения питания шаговых и вентильных двигателей, отслеживая параметры подаваемых на двигатели импульсов электроэнергии таким образом, чтобы обеспечить стабильность вращения, регулировать скорость двигателя, отслеживать возникновение аварийных ситуаций: токи короткого замыкания, перенапряжения, повышение температуры и т.п.

На сегодняшний день схемотехника и конструкция драйверов отработана многими производителями и разработка собственных устройств не требуется. Достаточно подобрать драйвер, соответствующий потребляемой электродвигателем мощности, выдающим необходимые двигателю ток и напряжение.

На практике, при 3Д-печати, управление двигателями производится в рамках реализации более сложного алгоритма – алгоритма печати того или иного изделия, который реализует контроллер верхнего уровня, строящийся на основе или микроконтроллера или программируемого логического контроллера (ПЛК). В результате, необходимо также проработать схемотехнические вопросы стыковки микроконтроллеров. Для определенности возьмем питающиеся напряжением +5В и укажем схемотехнические решения для выбранных в последующем драйверов с такими микроконтроллерами. Кроме того, в принципе, возможно построение

систем управления на основе ПЛК, поэтому рассмотрим и варианты подключения драйверов к ним.

1.1 Шаговые двигатели

Шаговые двигатели являются одним из типов электрических машин, которые предназначены для точного позиционирования вала двигателя и поворота его на определенный, наперед заданный угол.

Точность позиционирования достигается за счет наличия нескольких обмоток и подачи тока в виде импульсов в них по строгому алгоритму.

Такие двигатели находят наибольшее применение там, где необходим фиксированный, наперед определенный угол поворота вала двигателя: в 3Д-принтерах, ЧПУ-станках, робототехнике, в различных приводах устройств долгосрочного хранения информации.

Рассмотрим более подробно его описание.

Шаговый двигатель является синхронной [1] бесколлекторной электрической машиной, работающей в режиме двигателя. У него несколько обмоток в статоре. При подаче тока в обмотку статора происходит фиксация ротора около этой обмотки. Если последовательно подавать ток к разным обмоткам статора, то будут возникать дискретные повороты ротора, величина которых наперед фиксирована.

1.1.1 Конструкция и принцип действия шаговых двигателей

Конструктивно в состав шагового двигателя входит статор, на котором намотаны обмотки, ротор с валом, на который происходит крепление необходимой механической нагрузки. Ротор может выполняться из магнитомягкого или магнитотвердого материалов. Магнитный материал ротора позволяет получать при работе мотора крутящий момент значительно большей величины.

В общем виде устройство шагового двигателя показано на рисунке 1.

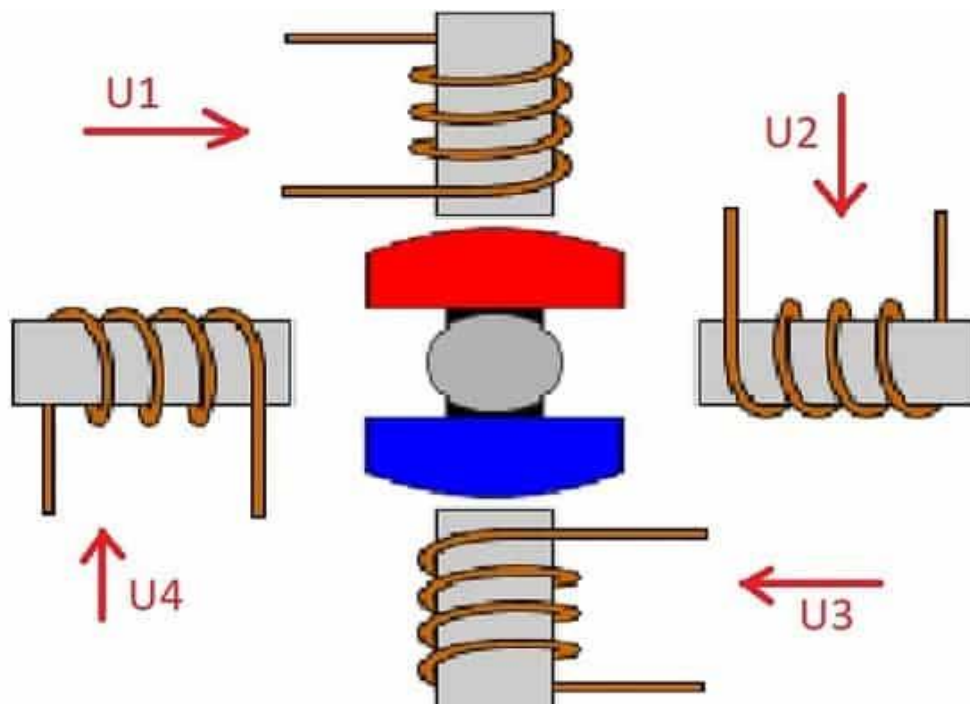


Рисунок 1 – Обобщенная схема устройства шагового двигателя.

В показанной на рисунке обобщенной схеме конструкции шагового двигателя используется четыре обмотки через которые протекает управляющий ток. В центре показан магнитный ротор, полюса которого обозначены разными цветами. Поскольку обмотки расположены под углом в 90 градусов друг к другу, шаг данного двигателя равняется 90 градусов.

При подаче импульса тока в обмотку u_1 ротор поворачивается на угол 90 градусов. Если в дальнейшем подавать импульсы напряжения на обмотки u_2 , u_3 , u_4 , то ротор будет совершать последовательные повороты на 90 градусов, завершив полный оборот вокруг своей оси. После этого возможно повторение цикла заново, для обеспечения вращения ротора. Чтобы поменять направление вращения ротора, меняют очередность подачи питающего напряжения на обмотки статора.

Если же удерживать последовательность импульсов на одной из обмоток, то можно добиться фиксации ротора в этом положении для компенсации внешних воздействий, проворачивающих ротор.

У шаговых двигателей важное значение имеют такие параметры как величина шага - минимальный угол, на который смещается вал при подаче одного питающего импульса, и момент, прикладываемый к ротору для его поворота или удержания. Различные сочетания этих параметров можно получить за счет изменения размеров ротора и статора, а также за счет изменений в их конструкции.

Различают следующие конструкции шаговых двигателей [2].

По конструкции ротора.

– Реактивный тип.

При реактивном типе конструкции на роторе двигателя отсутствуют магниты. Его выполняют из магнитомягких сплавов и для уменьшения потерь набирают из металлических пластин. Конструкция такого типа двигателя показана на рисунке 2.

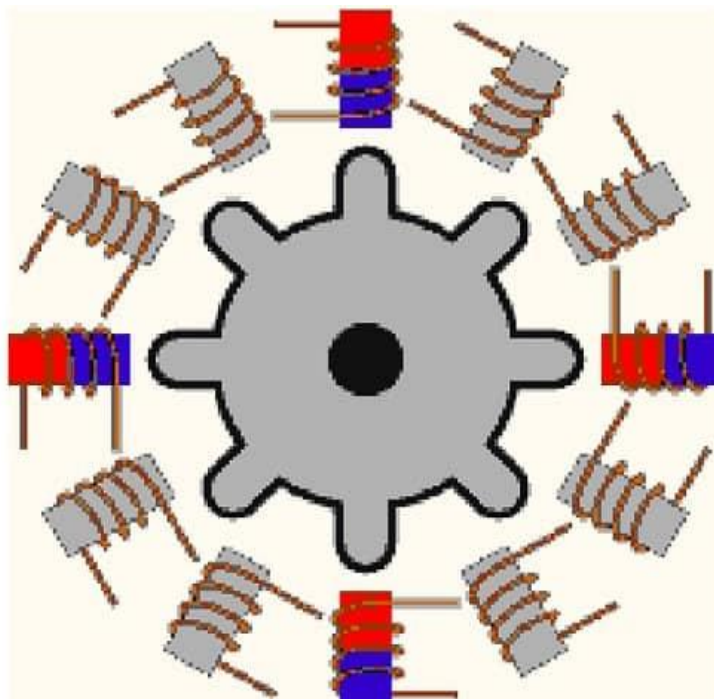


Рисунок 2 – Конструкция реактивного типа ротора шагового двигателя.

При таком исполнении шагового двигателя полюса статорных обмоток включаются к питающему напряжению противоположными концами, создавая магнитную силу, перемещающую ротор двигателя за счет протекания электрического тока поочередно в соседних парах обмоток.

В такой конструкции отсутствует стопорящий момент, что является ее неоспоримым плюсом. Недостатком такой конструкции является уменьшенная величина механического вращающего момента. Для двигателей с подобной конструкцией шаг угла поворота ротора лежит в пределах от 5 до 15 градусов.

– Ротор с постоянными магнитами.

В такой конструкции ротор изготавливается из постоянных магнитов, у которого выделяют два и более магнитных полюсов. Когда в определенные обмотки статора подается питающее напряжение и через них протекает электрический ток, то вызываемое им магнитное поле притягивает или отталкивает магнитные полюса ротора, вызывая его вращение. Конструкция подобного ротора показана на рисунке 3.

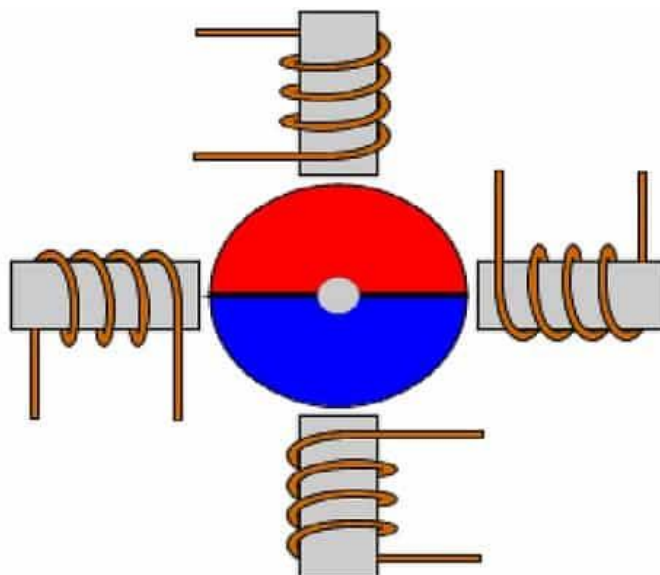


Рисунок 3 – Конструкция ротора с постоянным магнитом.

– Гибридные роторы.

Такие роторы объединяют положительные качества предыдущих типов роторов и выглядят так, как показано на рисунке 4.

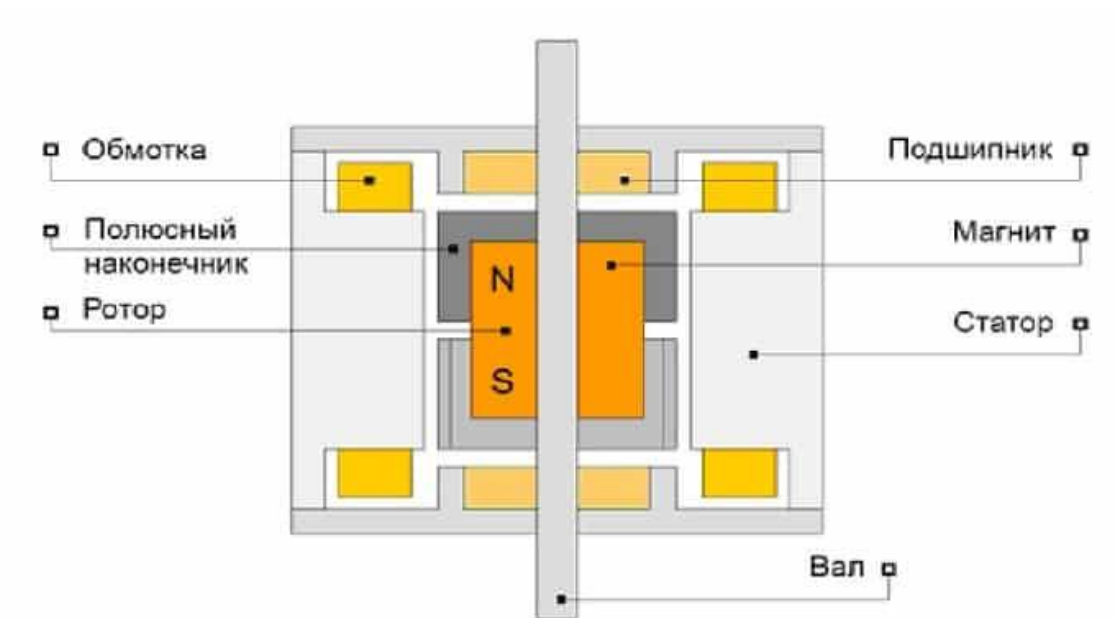


Рисунок 4 – Конструкция гибридного шагового двигателя.

За счет совместного использования качеств реактивного ротора и ротора с постоянными магнитами, таких роторы обладают меньшим углом поворота и, как следствие – большей точностью.

Из рисунка 4 видно, что ротор выполнен в виде постоянного магнита цилиндрической формы. Его намагничивание произведено вдоль продольной оси цилиндра. Фактически, на двух круглых полюсах располагаются зубцы ротора из магнитомягкого материала. Это позволяет добиться и высокого удерживающего момента и высокого крутящего момента.

Шаг перемещения гибридных шаговых двигателей лежит в пределах 0,9...5 градусов, что превосходит предыдущие типы двигателей. Это позволило использовать гибридные шаговые двигатели для построения высокоточных станков с ЧПУ, робототехнических комплексах, современных 3D-принтерах.

Рассмотрим вариант работы шагового двигателя с гибридным ротором на 200 шагов. Каждый из цилиндров полюсов ротора будет иметь 50 зубцов. Получается, что зубец положительной полярности располагается напротив отрицательного паза в другом цилиндре. Это выглядит, как показано на рисунке 5.

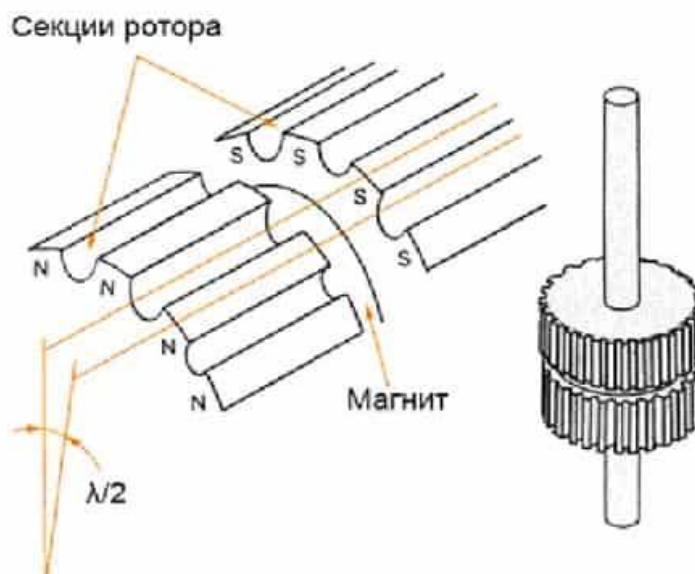


Рисунок 5 – Расположение секций гибридного ротора.

Вследствие этого на валу образованы 100 чередующихся пар полюсов с противоположной полярностью.

При этом, надо учитывать, что у статора также делают зубцы в дополнение к промежуткам между его элементами, как показано на рисунке 6.

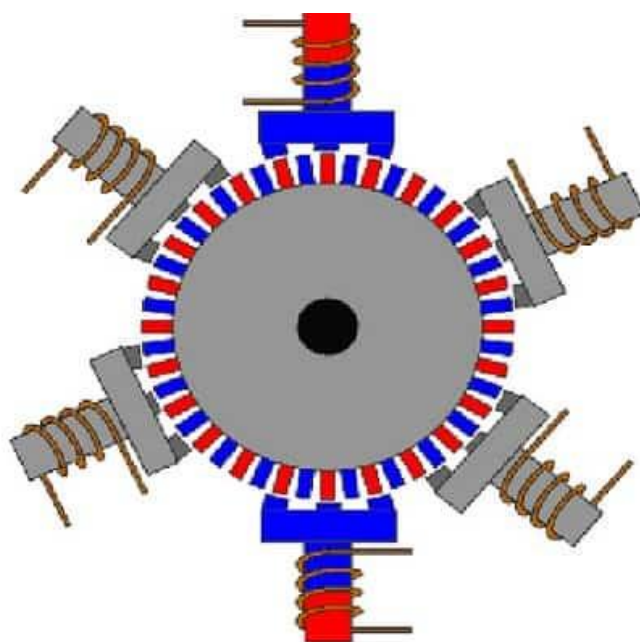


Рисунок 6 – Конструкция гибридного шагового двигателя.

Конкретно в этом примере сочетания количества полюсов можно достичь сдвига полюса ротора относительно полюса статора на 50 отличающихся позициях. Отличие положения между отрицательным и положительным полюсом в полпозиции дает перемещение уже в 100 различных положений ротора относительно статора. Если же смещать фазы на одну четверть значения шага, то можно довести количество шагов до 200, что дает точность в $360/200=1.8$ градуса.

В соответствии с рисунком 6, при подаче импульсов питающего напряжения на противоположные обмотки, полюса ротора подтягиваются к разноименным полюсам статора и отталкиваются от одноименных, которые идут по направлению вращения перед ними.

По виду обмоток статора деление шаговых двигателей производят следующим образом [3,4].

Поскольку шаговый двигатель представляет собой мотор с большим количеством фаз обмотки, то плавность его работы а, следовательно, и

точность позиционирования зависят от количества этих самых фаз или количества обмоток.

Чем больше количество обмоток статора, тем выше точность и плавность работы, но при этом увеличивается и трудоемкость при изготовлении а, следовательно, возрастает и стоимость двигателя. Крутящий момент мотора от количества фаз при этом не увеличивается, начиная от двух обмоток. При этом надо учитывать, что количество фаз и количество обмоток – это не тождественные понятия. У двигателя с двумя фазами количество обмоток может быть две и четыре.

По количеству обмоток двигателя делят на:

– Униполярные.

В этом типе двигателей имеется отвод от средней точки обмотки статора. Это дает возможность легко поменять текущие магнитные полюса обмотки. При этом, каждый конкретный момент можно использовать только одну половину обмотки, а вторая является балластом. Из-за этого достигается меньший механический момент на валу, чем мог бы быть достигнут при использовании всего имеющегося количества витков обмотки. Структура такой обмотки показана на рисунке 7.

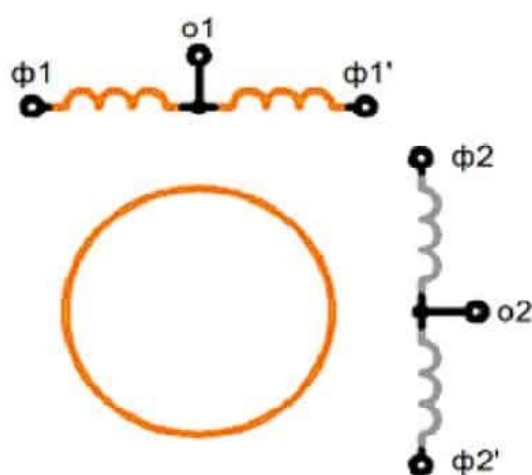


Рисунок 7 – Структура обмоток униполярного шагового двигателя.

Такие двигатели отличаются большими габаритами, по сравнению с двигателями с другими типами обмоток.

Существуют различные варианты использования средних выводов катушек статора. Они показаны на рисунке 8.

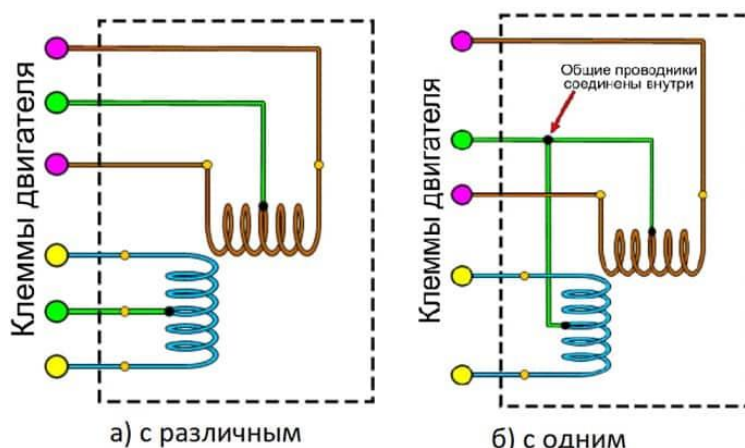


Рисунок 8 – Варианты использования отвода середины обмотки статора: а) с отдельными отводами от средних линий, б) с одним отводом от средней линии.

Следующий тип двигателей в зависимости от типа обмотки статора – биполярный.

– Биполярный тип двигателя.

Шаговые двигатели такого типа имеют две обмотки, которые подключаются к контроллеру (драйверу) с помощью 4 выводов. Структура обмоток статора такого двигателя показана на рисунке 9.

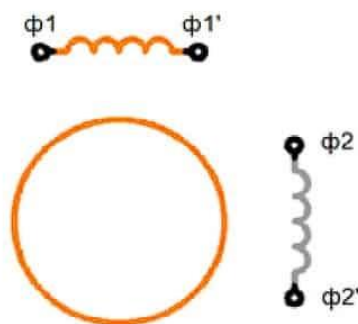


Рисунок 9 – Структура обмоток биполярного двигателя

Особенностью эксплуатации таких двигателей, является то, что биполярные импульсы питающего напряжения а, следовательно, и тока, должны обеспечивать внешние электронные схемы, называемые драйверами, которые строятся по принципу полупроводникового транзисторного моста. Биполярные шаговые двигатели позволяют получить момент, равный моменту униполярных двигателей при гораздо меньших габаритах самого мотора.

1.1.2 Ассортимент шаговых двигателей на мощности от 100 до 900 Вт

Для определения ассортимента шаговых двигателей на указанные мощности (от 100 до 900Вт) рассмотрим предложения российских продавцов специализированного оборудования. Рассмотрим каталоги компании Darxton [5] и ООО «ЧПУ Технологии» [6]. Эти продавцы предлагают следующие модели биполярных шаговых двигателей, которые сведем в единую таблицу 1.

Таблица 1 – Предложения биполярных шаговых двигателей

№п/п	Название	Мощность, Вт	Фланец	Момент, Нм	Ток, А	Индуктивность, мГн	Размер, длина x ширина x высота, мм	Цена, руб
1	ST57-100	136	57 мм (NEMA 23)	2.5	4.2	2.6	100x56x56	4284
2	ST86-80	184	86 мм (NEMA 34)	4.4	5.6	2.6	80x86x86	6640
3	ST86-114	340	86 мм (NEMA 34)	8.2	5.6	4.7	114x86x86	10750
4	ST86-118 D14	350	86 мм (NEMA 34)	8.5	5.6	5.0	118x86x86	10190
5	ST86-150	520	86 мм (NEMA 34)	9.5	5.6	5.6	150x86x86	14300
6	ST110-121	540	110 мм (NEMA 42)	13	6	1.2	121x111x111	15660
7	ST110-150	740	110 мм (NEMA 42)	21	6.5	1.2	150x111x111	19290
7	ST110-	740	110 мм	21	6.5	1.5	201x111x111	20000

	201		(NEMA 42)				1	
--	-----	--	-----------	--	--	--	---	--

Существует отдельный класс шаговых двигателей, которые имеют встроенный энкодер. Энкодер выдает импульсный сигнал при каждом повороте вала двигателя. Тем самым реализуется механизм обратной связи, с помощью которого драйвер или контроллер могут получить о факте поворота вала или же о количестве шагов, на которые повернулся вал. Всё это позволяет системе управления (контроллеру) понимать, повернулся ли вал на самом деле и на какой угол он повернулся, отслеживая тем самым аварийные ситуации, когда в силу каких-то причин происходит пропуск шагов двигателем, например при неисправностях драйвера, или же происходит заклинивание вала мотора или элементов последующих механических цепочек. На основании сочетания фактов, когда контроллер выдает драйверу команду на вращение двигателя и считывает информацию с энкодера, реализуется механизм защиты от различных аварийных ситуаций.

Рассмотрим, какие есть предложения шаговых двигателей в заданном нам диапазоне мощностей, имеющих в своем составе встроенные энкодеры. Результаты сведем в таблицу 2.

Таблица 2 – Предложения шаговых двигателей с энкодером в диапазоне мощностей 100-900 Вт.

№ п/п	Название	Мощность, Вт	Фланец	Момент, Нм	Ток, А	Индуктивность, мГн	Размер, длина x ширина x высота, мм	Цена, руб
	ST57-100E	136	57 мм (NEMA 23)	2.5	4.2	2.6	100x56x56	7285
	ST86-80E	184	86 мм (NEMA 34)	4.4	5.6	2.6	80x86x86	8985
	ST86-114E	340	86 мм (NEMA 34)	8.2	5.6	4.7	114x86x86	8085
	ST86-150E	520	86 мм (NEMA 34)	9.5	5.6	5.6	150x86x86	15410
	ST110-150E	740	110 мм (NEMA 42)	21	6.5	1.2	150x111x111	22060

1.1.3 Драйверы для питания обмоток шаговых двигателей

Управление работой шагового двигателя производится с помощью специальной электронной схемы, которая производит подключение источника питания на необходимые интервалы времени к нужным обмоткам. Эту функцию выполняет так называемый драйвер шагового двигателя [7].

Драйвер представляет собой мостовую схему на транзисторах биполярного или полевого типа, которая обеспечивает подключение источника питания к обмоткам с переменной полярностью. В простейшем случае, схему так называемого Н-моста можно изобразить как показано на рисунке 10 [8].

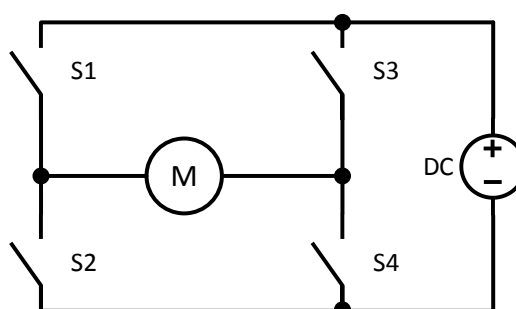


Рисунок 10 – Схема простейшего Н-моста

Таким образом, для каждой обмотки шагового двигателя, работающей в биполярном режиме необходимо наличие своего моста, который будет обеспечивать подключение к обмотке источника питания на требуемые интервал времени с необходимой полярностью. Поскольку, как было описано выше, в шаговых двигателях используется по несколько обмоток, необходимо обеспечить подключение к каждой из них своего инверторного канала.

Управление коммутацией обмоток может реализовываться несколькими способами:

- поочередное включение фаз;
- коммутация с перекрытием фаз;
- полушаговое управление;
- микрошаговое управление.

В первом способе управления полюса каждой обмотки четко выражены и в каждый конкретный момент времени к источнику питания подключается только одна фаза, точки равновесия ротора совпадают с точками равновесия, задаваемыми обмотками статора.

В случае перекрытия фаз ротор может занимать промежуточные позиции между шлицами статора. Это приводит к увеличению вращающего момента до величины почти на 40% превышающую момент при поочередном включении фаз. При таком способе питания угловой размер шага сохраняется.

Два первых способа применяются в оборудовании, где размер шага и точность позиционирования не критичны, а важны, в первую очередь, размер механического момента.

Следующий способ – полушаговый. В этом способе питающее напряжение подключается то к одной обмотке, то к двум. Размер шага уменьшается в два раза относительно шага в первых двух способах, возрастает точность позиционирования, уменьшается вероятность наступления резонанса в двигателе.

В микрошаговом режиме происходит управление величиной тока в каждой обмотке таким образом, чтобы менялось соотношение токов между соседними обмотками и ротор занимал определенные промежуточные положения между полюсами. При этом возможно несколько промежуточных положений и количество шагов двигателя увеличивается кратно относительно первых двух способов. При этом функция обеспечения

микрошагового режима лежит исключительно на драйвере и контроллере высокого уровня.

Пример подачи импульсов напряжения для питания шагового двигателя с помощью биполярного однофазного (волнового) управления показан на рисунке 11.

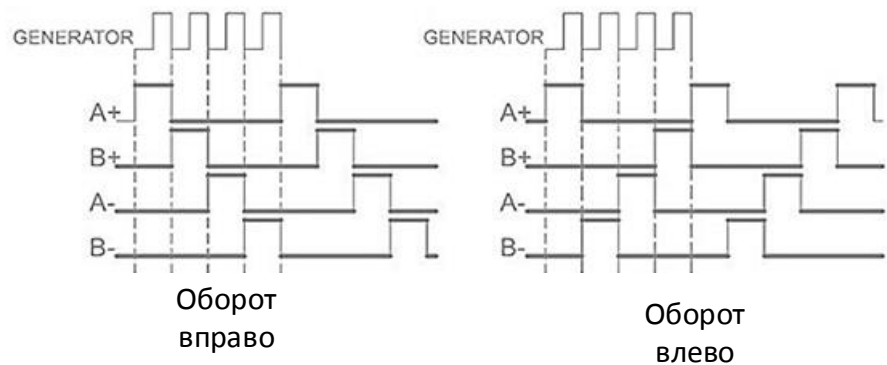


Рисунок 11 - Импульсы питания для биполярного шагового двигателя.

При этом, для питания таких двигателей нужны драйверы состоящие из двух мостовых схем с восемью транзисторами, например такие, как показано на рисунке 12.

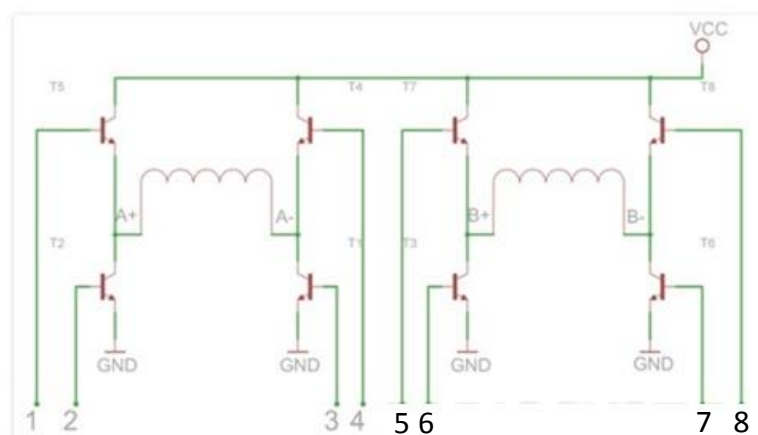


Рисунок 12 – Схема силового каскада драйвера для биполярного шагового двигателя.

Тогда импульсы управления силовыми транзисторами будут выглядеть, как показано на рисунке 13

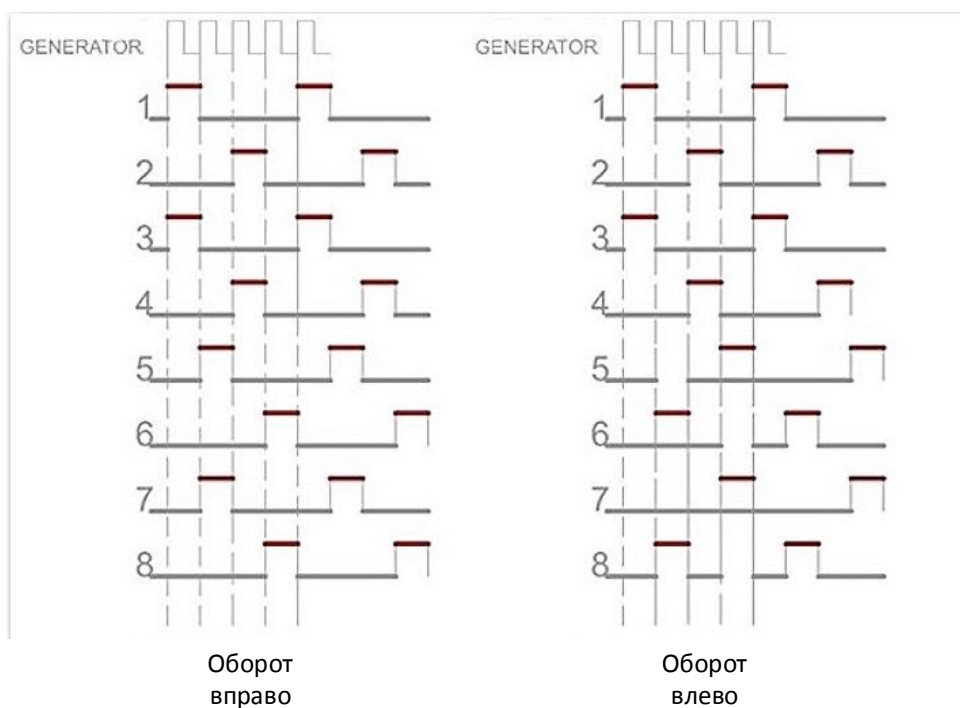


Рисунок 13 – Импульсы управления на транзисторы двойного Н-моста при биполярном способе питания шагового двигателя

Промышленно выпускаемые драйверы показаны на рисунке 14.



Рисунок 14 – Изображения промышленно выпускаемых драйверов шаговых двигателей.

С точки зрения пользователя драйвер шагового двигателя является полупроводниковым преобразователем, который имеет входы управления, задающие величину и направление вращения ротора. Для этих целей служат входные сигналы STEP/DIR, имеющие логические уровни. Эти сигналы генерируются контроллером, отвечающим за алгоритм работы всего устройства целиком. Это может быть специализированный контроллер, например, станка с ЧПУ или отдельный компьютер, предназначенный для управления двигателем или группой двигателей.

Драйверы делят на несколько типов.

– Драйверы постоянного напряжения. Они подают поочередно на обмотки напряжение постоянной величины. Ток в обмотке зависит как от активного сопротивления обмотки, так и от ее индуктивности. Чем выше скорость вращения двигателя, а значит и частота поступающих на обмотку импульсов постоянного напряжения, тем большую роль в задании режима работы драйвера начинает играть индуктивность обмотки двигателя. Как правило, эффективность таких драйверов на высоких скоростях неудовлетворительна и их применяют только на низких скоростях вращения ротора двигателя.

– Двухуровневые драйверы. В таких драйверах ток в обмотке возрастает до нужного уровня подачей высокого напряжения (происходит форсировка движения), а затем источник высокого напряжения отключается, а ток необходимой величины в установившемся режиме поддерживается с помощью сравнительно невысокого напряжения. Такие драйверы, по сравнению с драйверами первого типа меньше нагревают обмотки двигателя. Минусом таких драйверов является то, что они обеспечивают только режимы шага и полушага.

– Драйверы с управлением с помощью ШИМ. В настоящее время такие драйверы пользуются наибольшей популярностью и у производителей, и у потребителей. В этих драйверах реализована подача на обмотку шагового двигателя, модулированного по ширине постоянного напряжения, модуляция

которого задается отслеживанием фактического тока, протекающего по обмотке. Величину этого тока, как правило, можно задавать или с помощью переменного резистора, входящего в состав конструкции, или получать от контроллера более высокого уровня.

Как правило, в настоящее время в промышленных задачах применяются драйверы с ШИМ-управлением. Частоту ШИМ стремятся обеспечить не менее 20 кГц, чтобы выйти из слышимого человеческим ухом диапазона частот и обеспечить лучшие энергетические характеристики при питании двигателей.

При выборе драйвера шагового двигателя учитывают следующие параметры:

- номинальная/максимальная сила тока;
- напряжение питания;
- наличие опторазвязанных входов;
- наличие механизмов подавления резонанса;
- наличие защитных функций;
- наличие микрошаговых режимов;
- дополнительные функции мониторинга и управления

1.1.4 Контроллеры управления шаговыми двигателями и их возможности

Следующий элемент в цепочки управления шаговыми двигателями – контроллер. В настоящее время на рынке представлены контроллеры следующих основных типов [9]:

Контроллеры, сочетающие в себе функции драйверов двигателей, т.е. позволяющие подключить шаговый двигатель непосредственно к выходу контроллера и контроллера, реализующего генерацию управляющих импульсов в соответствии с тем или иным алгоритмом питания шагового двигателя.

Такие контроллеры могут [10]:

- реализовывать программу, состоящую из G-кодов, записываемую с внешнего компьютера или программируемого логического контроллера,
- управляться непосредственно от внешнего компьютера или ПЛК через интерфейсы различных типов: параллельный Centronix, последовательные синхронные/асинхронные UART/USART интерфейсы например RS232, через интерфейсы, позволяющие организовывать сетевое подключение различной сложности такие как RS485, Modbus, а модели последних поколений позволяют организовывать даже подключение с помощью Ethernet или Wi-Fi.

При этом, в отличие от просто драйверов двигателя, которые допускают подключение и управление только одним двигателем, такие контроллеры могут обслуживать сразу несколько шаговых двигателей, входящих в состав единого устройства, например станка с ЧПУ.

Примером таких контроллеров могут быть, например, модели OSM 88U, OSM 88R, OSM17R, OSKRA, OSKU фирмы ООО «Онитекс» [11], контроллеры в виде платы расширения для персонального компьютера WEIHONG PCIMC-XX: PCIMC-3D, PCIMC-53B, PCIMC-74A и т.д. [12].

2. Контроллеры, представляющие собой устройства с человеко-машинным интерфейсом (HMI) той или иной сложности. Такие контроллеры имеют экраны, кнопки, которые упрощают работу с внешними носителями, на которых записана управляющая программа, управление ручным позиционированием рабочего органа, работу с внешним компьютером, с контроллерами, объединенными в одну сеть и т.п. Такие контроллеры носят название «автономные». Примером таких контроллеров являются DDCSV3.1, серия контроллеров TC55XX, включающая в себя варианты контроллеров на разное количество осей.

Пример внешнего вида автономного контроллера показан на рисунке 15.



а)



б)

а) – Автономный контроллер TC5530, б) – Автономный контроллер DDCSV3.1

Рисунок 15 – Внешний вид автономных контроллеров

1.2 Вентильные двигатели

1.2.1 Конструкция и принцип действия вентильных двигателей

Кроме шаговых двигателей для точного управления положением вала двигателя могут использоваться так называемые вентильные двигатели.

Вентильные двигатели [13] представляют собой синхронную электрическую машину, в состав которой входит статор с многофазной обмоткой, ротор с встроенными постоянными магнитами и датчиком положения. Для коммутации в определенном порядке обмоток статора такой электрической машины, в ее состав в качестве неотъемлемой части входит полупроводниковый преобразователь. Именно необходимость использования совместно с двигателем полупроводникового (вентильного) преобразователя обозначается в названии этого типа электрических машин словом «вентильный».

В таком двигателе индукторная обмотка наматывается на ротор, а на статоре располагается якорная обмотка. При этом, напряжение питания подается на обмотки в зависимости от положения ротора, которое определяется с помощью встроенных датчиков обратной связи.

Таким образом, вентильные двигатели считают двигателями постоянного тока со всеми их особенностями и достоинствами, только вместо щеточного узла, являвшегося в традиционных двигателях постоянного тока источником их недостатков, используется коммутация с помощью полупроводниковых ключей (вентилей). При этом конструкцию вентильных двигателей как бы «вывернули»: якорь у них неподвижен, а постоянные магниты вращаются на роторе.

В вентильных двигателях выделяют три составляющих части:

- механическую,
- электрическую,
- электронную.

Рассмотрим устройство вентильного двигателя по рисунку 16 [14].

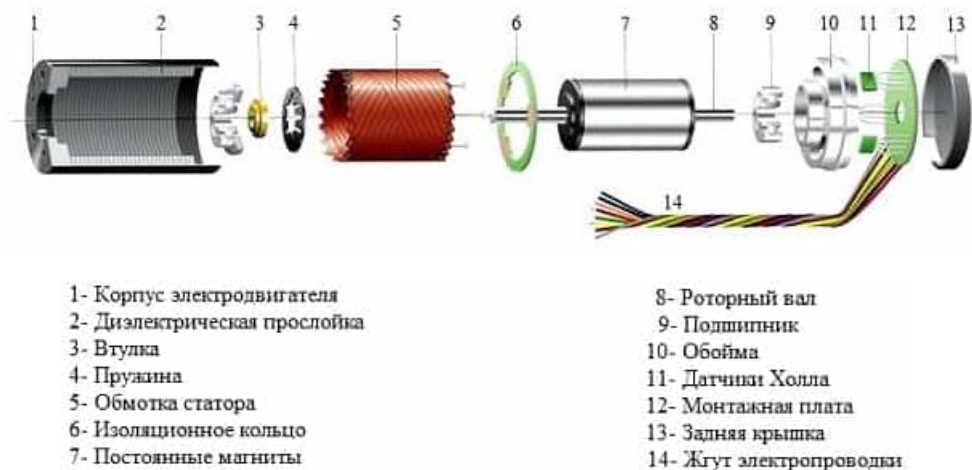


Рисунок 16 – Устройство конструкции вентильного электродвигателя

Для работы вентильного электродвигателя постоянные магниты ротора должны быть точно спозиционированы относительно к той обмотке статора, на которую подается электромагнитный импульс. Информацию о положении ротора дают датчики Холла, встроенные в двигатель. Информация с датчиков поступает на систему управления (драйвер двигателя) и она подает постоянное напряжение на необходимую обмотку статора, что вызывает протекание через нее тока, вызывающего магнитное поле, заставляющее ротор двигаться в нужном положении на необходимую величину угла поворота.

Это означает, что постоянное напряжение подается «бесконтактным» образом и такие двигатели, также, называют «бесколлекторными».

На рисунке 17 показан один из вариантов конструкции вентильного (бесколлекторного) двигателя.



Рисунок 17 – Вариант конструкции вентильного электродвигателя.

Конструктивно, статор вентильного мотора представляет собой наборную из пластин электротехнической стали или в некоторых вариантах цельнолитой магнитопровод с пазами, в которых укладывается обмотка. Количество фаз двигателя определяет количество обмоток. Чем чаще уложены статорные обмотки в статоре, тем точнее можно проконтролировать положения вала двигателя.

Статор имеет полюса. Их можно смещать на некоторый угол. В зависимости от числа фаз двигателя бывают 2-х, 3-х, 4-х или 6-ти фазными.

В вентильных двигателях можно использовать два варианта конструкции: когда статор располагается снаружи двигателя или, когда он располагается внутри двигателя. Во втором случае ротор исполняется в виде пустотелого цилиндра с закрепленными на нем изнутри магнитами. Во втором случае получается, что вращается внешняя часть двигателя, что необходимо учитывать соответствующим образом при разработке конструкции изделий, в которых применяются такие бесколлекторные двигатели.

Описанные варианты исполнения роторов и статоров показаны на рисунке 18.

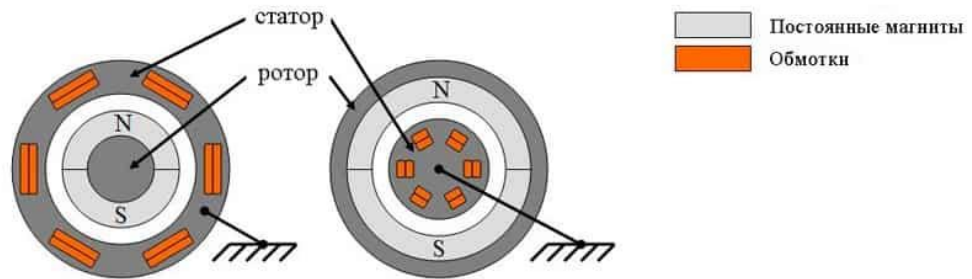


Рисунок 18 – Варианты исполнения вентильного двигателя с внутренним и внешним расположением статора.

Количество пар полюсов в вентильных двигателях может быть от двух до 16 с четным шагом.

В качестве магнитных элементов используют постоянные магниты из редкоземельных материалов с высокими показателями индукции, что обеспечивает более точное позиционирование.

Пример реального бесколлекторного двигателя с ротором, исполненным в виде наружного цилиндра показан на рисунке 19.



Рисунок 19 – Разобранный бесколлекторный двигатель с внешним ротором.

Для определения точного положения вала вентиляльного двигателя используют датчики [15,16].

Они бывают следующих видов:

- датчики Холла,
- индуктивные датчики,
- трансформаторные датчики,
- фотоэлектрические датчики.

Наибольшее распространение получили датчики Холла и фотоэлектрические датчики, поскольку они обладают наивысшим быстродействием и точностью из перечисленных. Для привязки датчиков используют особые маркеры на валу – оптического или магнитного типа.

Рассмотрим работу вентиляльного электродвигателя на примере трехфазного двигателя с постоянными магнитами на роторе [16]. Постоянный ток подается поочередно в две соединенных последовательно фазные обмотки. Переключение обмоток производится полупроводниковым коммутатором (рисунок 20).

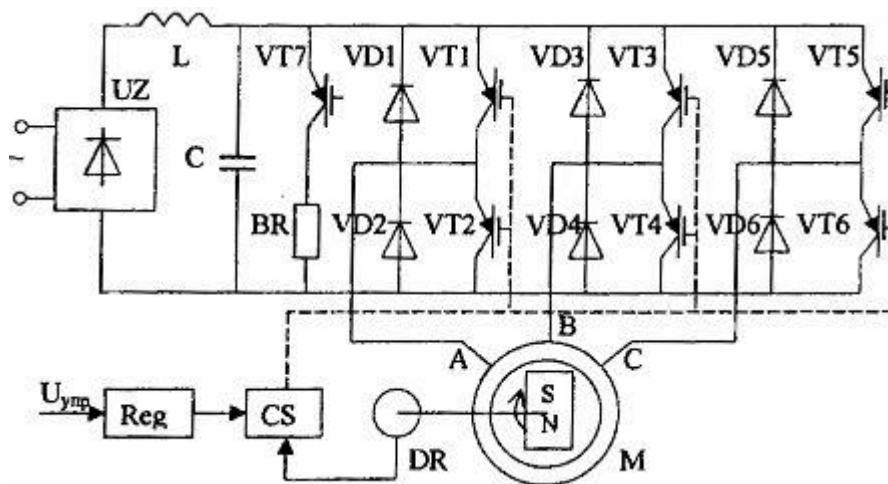


Рисунок 20 – Трехфазный вентиляльный электродвигатель с транзисторным коммутатором.

Электродвигатель создает механический момент, который задается двумя потоками: потоком, создаваемым в статоре током статорных обмоток и потоком, создаваемым постоянными магнитами ротора.

Под действие магнитного потока статора, ротор с постоянными магнитами поворачивается так, чтобы поток ротора совпал по направлению с потоком статора. Механический момент, создаваемый на валу ротора, возникает при угле между потоками ротора и статора равными 90 градусам. По мере сближения векторов потоков момент будет уменьшаться.

Величина напряжения питания на обмотках изменяется с помощью широтно-импульсной модуляции. Регулируя длительность проводящего состояния транзисторов преобразователя-коммутатора можно менять среднее значение напряжения на обмотках двигателя и, как следствие, менять величину потока статора. Таким образом, происходит регулирование скорости вращения вентильного двигателя.

Если поменять коммутацию приборов полупроводникового преобразователя так, чтобы вектор м.д.с. отставал от вектора потока ротора, то начнется процесс торможения двигателя. Если бы на входе преобразователя стоял управляемый выпрямительный мост, то была бы возможна рекуперация энергии, запасенной в двигателе обратно в источник электрической энергии. Но поскольку, в схеме на рисунке 20, выпрямитель на входе преобразователя неуправляемый, то запасенная в двигателе энергия на этапе торможения запасается в конденсаторе C , и может быть рассеяна в шунтирующем балластном резисторе BR при открывании транзистора $VT7$.

Достоинствами вентильных двигателей считают следующее:

- малую величину потерь на магнитный гистерезис вследствие постоянного магнитного поля, аналогично традиционным синхронным и асинхронным двигателям;
- устойчивое вращение вала двигателя даже с максимальной нагрузкой на нем, в отличие от коллекторных электродвигателей;

- широкий диапазон скоростей вращения с плавным переходом от одной к другой за счет встроенного или комплектного преобразователя частоты;

- высокая точность позиционирования и хорошая динамика работы, сопоставимая с работой шаговых двигателей;

- за счет отсутствия скользящей контактной группы высокая надежность и длительный срок эксплуатации без обслуживания;

- в отличие от щеточных двигателей может применяться во взрывоопасной среде.

Недостатки вентильных двигателей:

- высокая стоимость;

- наличие дополнительных элементов, которые могут усложнить эксплуатацию;

- сложность управления, по сравнению с прочими типами двигателей, при изменяющихся факторах производственного процесса.

1.2.2 Ассортимент вентильных двигателей на мощности от 100 до 900 Вт

На рынке вентильные двигатели представлены рядом мощностей, напряжением питания 12, 24, 48 В. Они могут дополнительно включать в свою конструкцию редукторы, как правило – планетарные, а также существует некоторое количество моделей, включающих в свой состав коммутирующие вентильные полупроводниковые преобразователи.

Рассмотрим ряд двигателей, предлагаемых поставщиками и отечественными производителями.

Компания Purelogic [17] предлагает следующую линейку бесколлекторных вентильных двигателей (BLDC) [18], сведенную в таблице 3.

Таблица 3 – Технические характеристики двигателей серии BLF и BLM.

Артикул	Lmax, мм	Напряжение, В	Ток, А	Сопротивление фазы, Ом	Номинальная частота вращения, об/мин	Номинальный крутящий момент, Нм	Максимальный крутящий момент, Нм	Постоянный крутящий момент, Нм/А	Мощность, Вт	Масса, кг	Цена, руб
PL57BLM05	75	24	6.6	0.65	3000	0.33	1	0.062	103	0.8	9 668
PL57BLF02	79	24	18.6	0.3	3000	0.4	1.2	0.066	125	1	12663
PL57BLM07	115	24	7.9	0.5	3000	0.49	1.5	0.09	153	1.5	10878
PL57BLF03	101	24	27.8	0.2	3000	0.6	1.8	0.066	188	1.4	17460
PL86BLF02	67	48	19.8	1.26	3000	0.7	2.1	0.112	220	1.75	18529
PL86BLM02	80	48	6.6	1.26	3000	0.7	2.1	0.11	220	1.7	18192
PL86BLM03	90	48	9.6	0.67	3000	1.05	3.2	0.11	330	2.2	20244
PL86BLF03	81	48	29	0.67	3000	1.05	3.2	0.115	330	2.2	20244
PL86BLF04	9Д	48	38	0.47	3000	1.4	4.2	0.115	440	2.75	27636
PL86BLM04	115	48	14	0.47	3000	1.4	4.2	0.13	440	2.8	27714
DT80BLF140-3140	140	310			4000	1,2	2,4		500	1,8	33292
DT80BLF140-3160	140	310			6000	1,2	2,4		750	1,8	33292
FL110BLS51	120	60	68	0,069	3000	3	3,6		942	4,8	59916

Также продавец предлагает бесколлекторные мотор-редукторы - бесколлекторный двигатель конструктивно объединенный с редуктором. Внешний вид таких изделий показан на рисунке 21 [19].



Рисунок 21 – Внешний вид мотор-редукторов.

Параметры разных типов мотор-редукторов и их стоимость показаны в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры разных типов мотор-редукторов

Серия		PL57BLF03	PL86BLF0	PL86BLF03	PL86BLF04
Длина корпуса двигателя (L1), мм		101	67	81	94
Количество фаз двигателя		3	3	3	3
Номинальное напряжение, В постоянного тока		24	48	48	48
Сопротивление фазы, Ом		0.24	0.34	0.23	0.2
Скорость без нагрузки, об/мин		4000±10%	3700±10%	3700±10%	3700±10%
Номинальная скорость, об/мин		3000±10%	3000±10%	3000±10%	3000±10%
Крутящий момент, Н-м		0.6	0.7	1.05	1.4
Номинальная мощность, Вт		188	220	330	440
Постоянная момента, Н-м/А		0.066	0.11	0.11	0.128
Класс изоляции		Class B	Class B	Class B	Class B
Электрическая прочность изоляции, E переменного тока / 1 мин		500	500	500	500
Сопротивление изоляции, МОм		100	100	100	100
Длина корпуса редуктора, мм	Передаточное отношение от 1:3 до 1:10	116.5	152	152	152
	Передаточное отношение от 1:15 до 1:70	131.5	173	173	173
Цена, руб		33850	49100	52600	51300

1.2.3 Драйверы для питания обмоток вентильных двигателей

Для подачи питающего напряжения на вентильные электродвигатели используют драйверы, которые формируют напряжение и ток с необходимыми для задания необходимого направления и скорости вращения. На драйверах также лежит функция торможения бесколлекторных

двигателей, когда надо рассеять запасенную электрическую и кинетическую энергию. Это электронные схемы, состоящие из силовой части в виде мостового преобразователя на IGBT или MOSFET, состояние которых управляется внешними сигналами, от контроллера верхнего уровня. Структурная схема драйвера, управляющего вентильным двигателем, показана на рисунке 20. С выхода драйвера отводятся три линии для питания двигателя, от двигателя в драйвер заходят три сигнала от датчиков Холла, на которые, опять же от драйвера подается питание +5В. От управляющего контроллера на вход драйвера поступает сигнал вращения по часовой или против часовой стрелки, опционально может приходиться на драйвер сигнал включения торможения и снимается служебное напряжение питания +5В. Питание драйвера осуществляется от внешнего источника питания, которое в зависимости от напряжения питания двигателя может быть или постоянным +12, +24, +48, ..., +300В или же переменным однофазным 220В или трехфазным 380В.

Рассмотрим некоторые примеры номенклатуры драйверов [20] бесколлекторных двигателей мощностью от 100 до 900 Вт, сведенные в таблицу 5

1.2.4 Контроллеры управления вентильными двигателями и их возможности

Управление работой драйвера вентильного привода организуется с помощью контроллера. Контроллеры могут быть как специализированного вида, так и универсальными программируемыми логическими контроллерами (ПЛК).

Рассмотрим блоки управления бесколлекторными двигателями, на примере блоков, производимых компанией «Электропривод» [21].

Блоки управления (таблица 6) предназначены для двигателей с напряжениями питания 24-48В. Они сочетают в себе некоторые функции драйверов и позволяют выполнять следующие операции:

Таблица 5 – Параметры драйверов бесколлекторных двигателей.

Серия	BLDC-4008	BLDC-5015	BLDC-5015A	BLDC-DZZ	NVBD H	NVBD L	DBLS-08-S
Напряжение питания, В	36 VDC	50 VDC	50 VDC	36 VDC	60 VDC	60VDC	220VAC
Рабочий ток, А	8	15	15	10	10	10	3,5
Мощность, Вт	300	750	750	300	600	600	750
Интерфейс	START/STOP/DIR	START/STOP/DIR	START/STOP/DIR	START/STOP/DIR	START/STOP/DIR	START/STOP/DIR	START/STOP/DIR
Тип используемых датчиков положения вала	Холла	Холла	Холла	Холла	Холла	Холла	Холла
Управление скоростью через аналоговый вход	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Управление скоростью с помощью ШИМ	Нет	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Сигналы обратной связи	Нет	Нет	Скорость вращения вала, авария	Сигнал термистора NTC	Скорость вращения	Скорость вращения	Сигнал аварии
Варианты защиты электронных цепей	Нет	Нет	Защита от КЗ и от обратной ЭДС двигателя	Защита от КЗ и от обратной ЭДС двигателя			Защита от КЗ и от обратной ЭДС двигателя
Цена, руб	11689	19184	15240	27433	14660	14276	40624

- непосредственно управлять скоростью вращения двигателя с помощью потенциометра;
- использовать для управления аналоговый сигнал в диапазоне 0...5 В;
- регулировать ускорение и замедление двигателя;
- изменять направление вращения двигателя;
- тормозить двигатель;
- организовывать отправку команд управления по интерфейсу RS-485.

Таблица 6 – Блоки управления с функцией драйверов

Наименование	Напряжение питания блока, В	Ток, А (номинальный/максимальный)	Способ управления
BLD-20DIN	24–48	20/80	Аналоговое
BLSD-20Modbus	24–48	20/80	Аналоговое, RS-485
BLSD-20	24–48	20/30	
BLSD-50	24–48	50/70	
BLD-20	24–48	20/30	Аналоговое
ZWSK	24–48	2,5–25/5–50	Аналоговое

Внешний вид конструкции одного из контроллеров вентильных двигателей показан на рисунке 22.



Рисунок 22 – Контроллер вентиляных двигателей.

Блок управления имеет кнопки START/STOP и DIR. По умолчанию их функции – начало/остановка движения и выбор направления вращения. При этом пользователь имеет возможность поменять их функционал.

Использование интерфейса RS-485 дает возможность управлять двигателем в реальном масштабе времени. При этом блоки управления поддерживают работу по протоколу Modbus RTU/ASCII.

Некоторые из контроллеров (BLSD- 20 и BLSD- 50) дают возможность совместно с контроллером использовать программное обеспечение VxSD_program, которое позволяет управлять работой двигателя в реальном времени. Также оно дает возможность настраивать разрешение датчика обратной связи.

Контроллеры BLSD допускают работу совместно с панелью оператора MT6071iE.

При работе совместно с панелью, пользователь непосредственно на ней может писать код, записывать и считывать с носителя программы, управлять в режиме реального времени двигателем и получает расширенные настройки параметров контроллера и двигателя.

Другим представителем на рынке контроллеров вентильных двигателей является отечественное изделие МКВД (Модуль контроллера вентильного двигателя), производимое АО «Электрум АВ» [22].

Модуль контроллера вентильного двигателя формирует сигналы управления вентильными элементами драйвера трехфазного вентильного двигателя на постоянных магнитах с датчиками положения ротора.

Этот контроллер поддерживает следующие функции:

- генерация сигналов управления драйвером двигателя,
- управление процессом старт/стопа двигателя,
- регулировку скорости вращения вала двигателя,
- управление направлением вращения вала двигателя,
- стабилизацию скорости при изменениях напряжения питания системы,
- защиту двигателя от перегрузок по току и короткого замыкания,
- имеет возможность изменять порог токовой защиты,
- предоставляет возможность использовать внешнюю сигнализацию о возникновении аварийных режимов.

Структурная схема МКВД показана на рисунке 23.

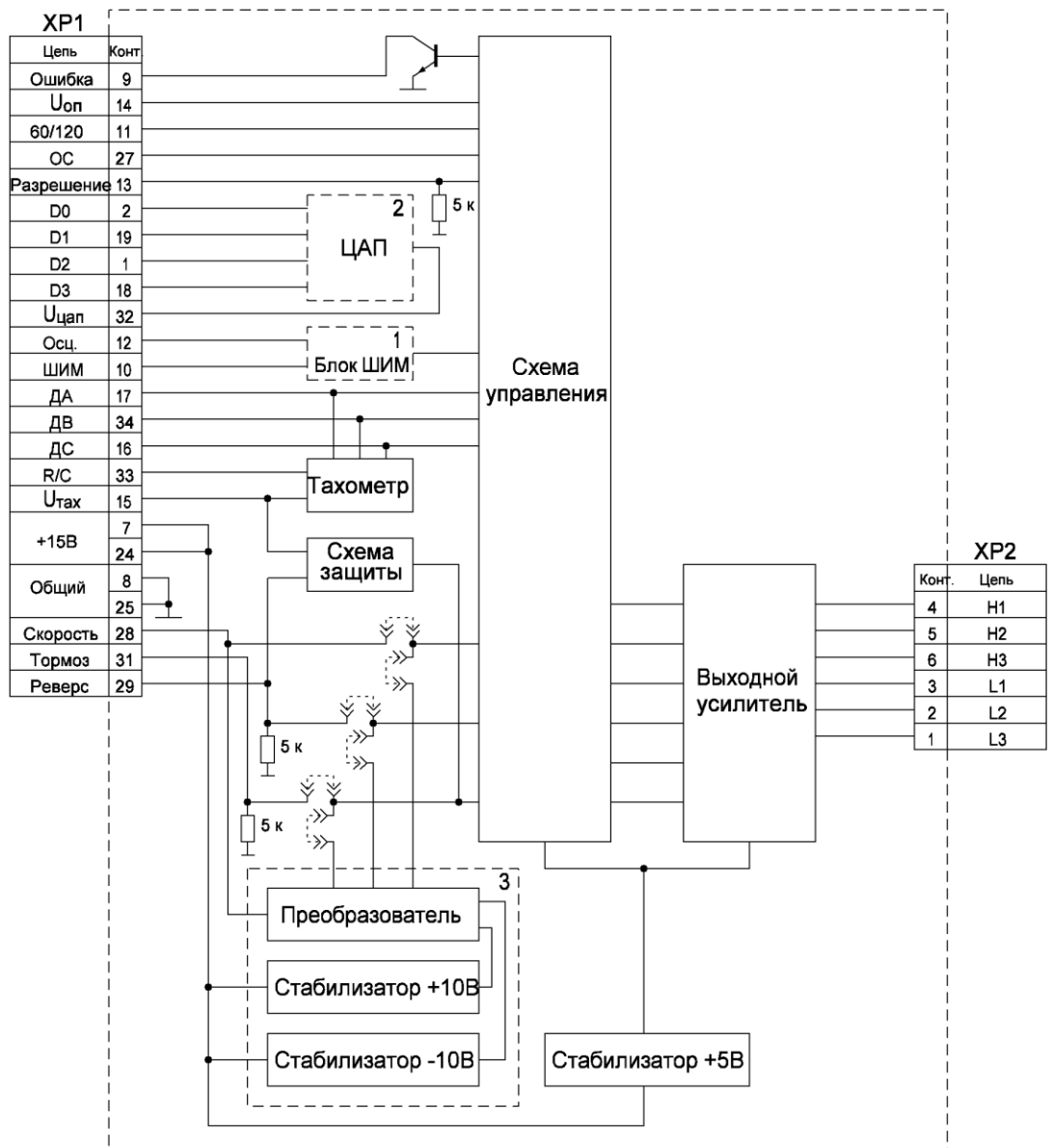


Рисунок 23 – Структурная схема контроллера вентильных двигателей МКВД

На этой схеме отмечены блоки:

«1» - схема внутреннего ШИМ-генератора,

«2» - внутренний ЦАП,

«3» - схема управления, входящая в состав МКВД для вариантов двуполярного управления.

1.3 Задачи бакалаврской работы

Задачей бакалаврской работы является подбор нескольких комплектов совместимого оборудования: шаговый двигатель-драйвер шагового двигателя - контроллер, вентильный двигатель – драйвер вентильного двигателя - контроллер, которое будет согласовано между собой по параметрам. По результатам подбора необходимо вычертить схемы соединений и оценить примерную стоимость комплектов на текущий момент.

2 Приводные узлы на основе шаговых двигателей

2.1 Узел с номинальной мощностью двигателя около 100Вт.

В соответствии с поставленными задачами на работу, подберем по три варианта шаговых двигателей и их драйверов на разные мощности из диапазона 100-900 Вт и изобразим схему соединений в полученном приводном узле. Для определенности возьмем шаговые двигатели с мощностью ближе к нижней границе диапазона мощностей, около верхней границы и в середине интервала.

В качестве двигателя возьмем модель ST57-100 мощностью 136 Вт с номинальным током 4,2 А, моментом 2,5Нм и индуктивностью 2.6 мГн (см. таблицу 6). Рекомендую для использования совместно с этим двигателем драйвером, является модель DM556E производства LEADSHINE.

Эта модель является цифровым настраиваемым драйвером шагового двигателя. Он позволяет подавлять резонанс в двигателе, выполнять автоматическую подстройку под двигатель, обладает функцией мультистеппинга, обеспечивает мягкий пуск двигателя, а также предоставляет защиту от короткого замыкания, переплюсовки и превышения напряжения.

Его технические характеристики представлены в таблице 7.

Внешний вид показан на рисунке 24, а габариты - на рисунке 25



Рисунок 24 – Внешний вид драйвера LEADSHINE DM556E

Таблица 7 – Технические характеристики драйвера LEADSHINE DM556E

Параметр	Значение
Подходящие двигатели	2х-фазный ШД
Ток, I	4.0 А
Ток пиковый	5.6 А
Напряжение, U	20..50 В
Управление	STEP/DIR
Частота импульсов	200 кГц
Микрошаг	до 1/512
Доп. функции	подавление резонанса мультитеппинг
Защиты	от превышения тока(КЗ) от превышения напряжения от переплюсовки(настр.)
Габаритные размеры	118 x 75.5 x 34 мм

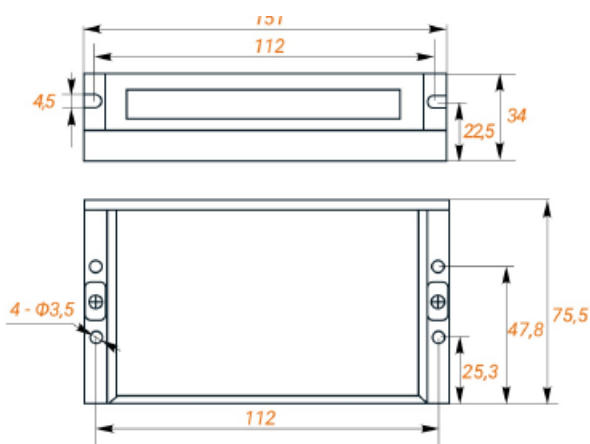


Рисунок 25 – Габаритные размеры драйвера LEADSHINE DM556E.

Внешний вид разъемов драйвера показан на рисунке 26.

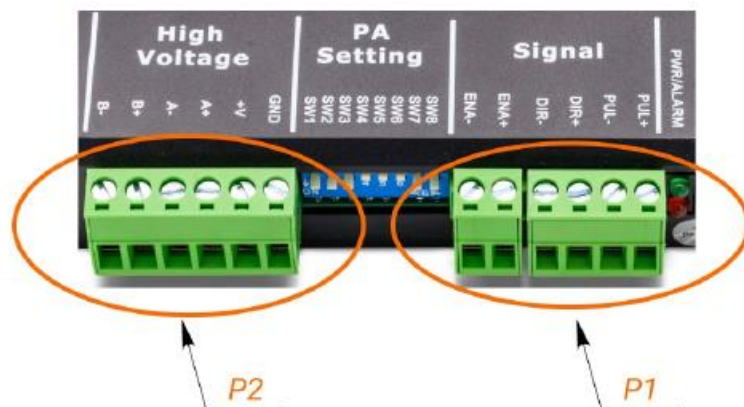


Рисунок 26 – Внешний вид разъемов драйвера LEADSHINE DM556E.

Назначение выводов разъемов P1 и P2 приведено в таблицах 8 и 9 соответственно.

Таблица 8 – Назначение выводов разъема P1

Пин	Описание
PUL+	Импульсный сигнал шага (STEP), активный нарастающий фронт. Высокий уровень 4-5 вольт, низкий уровень 0-0.5.
PUL-	Минимальная длительность импульса 2.5 мкс. При напряжении сигналов 12/24 В используйте токоограничивающий резистор на 1/2 кОм.
DIR+	Сигнал направления (DIR), регулирует низким/высоким уровнем напряжения направление вращения двигателя.
DIR-	Минимальное время установки направления 5.0 мкс. Направление вращения можно также изменить, поменяв местами провода одной фазы (например, A + и A-). При напряжении сигналов 12/24 В используйте токоограничивающий резистор на 1/2 кОм.
ENA+	Сигнал включения/выключения привода. При NPN-схеме высокий уровень включает привод, низкий - отключает.
ENA-	При дифференциальной и PNP-схеме низкий уровень включает привод, высокий - отключает. По умолчанию контакт "ENA" неподключен (привод включен) При напряжении сигналов 12/24 В используйте токоограничивающий резистор на 1/2 кОм.

Таблица 9 – Назначение выводов разъема P2

Пин	Описание
GND	"Земля" (или "минус") источника питания, 0В
+V	"Плюс" источника питания, 20-50 В (постоянный ток)
A+	Контакт A+ фазы А двигателя
A-	Контакт A- фазы А двигателя
B+	Контакт B+ фазы В двигателя
B-	Контакт B- фазы В двигателя

Поскольку основная задача работы – определить несколько вариантов электрических соединений шаговых моторов и драйверов для одной оси 3D-принтера, то будем считать, что управление драйвером будет осуществляться от некоторого третьего контроллера верхнего уровня.

Изобразим электрические соединения между шаговым двигателем и драйвером с учетом необходимых дополнительных узлов и элементов в случае необходимости (рисунок 27).

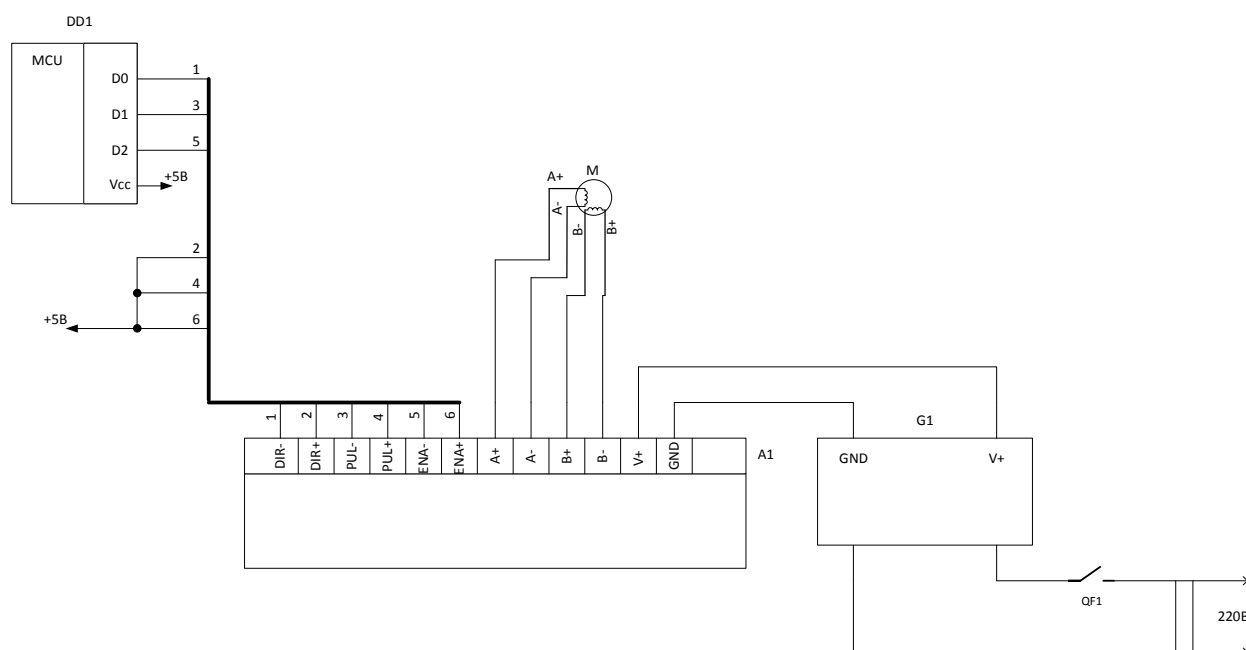


Рисунок 27 – Схема соединения двигателя ST57-100, драйвера LEADSHINE DM556E и подключение к управляющему микроконтроллеру с питанием +5В.

При подключении в качестве управляющего устройства программируемого логического контроллера (ПЛК), питающегося от напряжения +24В, в схему необходимо добавить токоограничивающие резисторы на информационные входы драйвера. Тогда схема подключения будет выглядеть, как показано на рисунке 28.

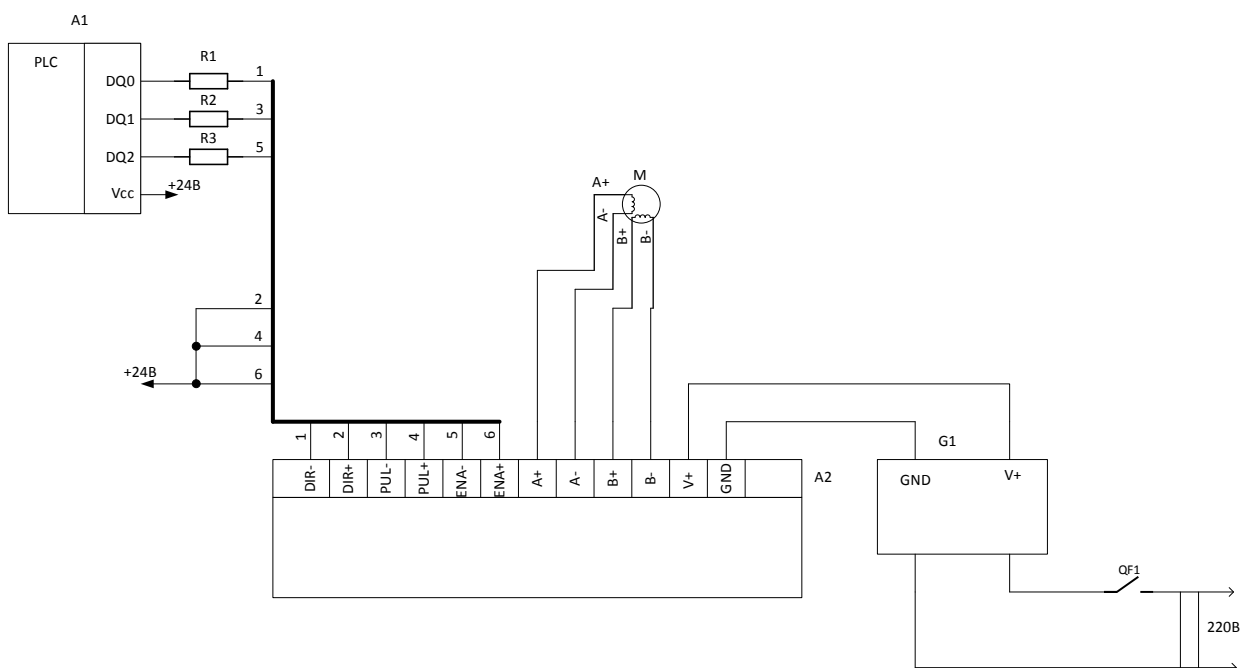


Рисунок 28 - Схема соединения двигателя ST57-100, драйвера LEADSHINE DM556E и подключение к управляющему микроконтроллеру с питанием +24В.

Сопротивления резисторов R1-R3 принимаем равными 2кОм в соответствии с указаниями разработчика [23]. Источник питания G1 должен обеспечивать выдачу тока больше, чем максимальный ток, потребляемый двигателем, с учетом тока, потребляемого собственно схемой драйвера.

Максимальный ток двигателя ST57-100 4.2А. Заложив запас не менее 20% определим, что ток, отдаваемый источником питания должен быть не менее 5А.

Двигатель работает с питающим напряжением в диапазоне 20-50В. Чем выше величина напряжения, тем выше скорость вращения вала двигателя.

Однако при этом увеличивается степень нагрева, как самого двигателя, так и питающего его драйвера. Поскольку в задании не оговорены скоростные параметры вращения двигателя, примем в качестве рабочего напряжение 36В, которое является практически серединой рабочего диапазона.

Таким образом, параметры источника питания для питания нашей схемы: + 36 В, выходной ток не менее 5А.

Выбираем источник питания MEAN WELL LRS-200-36 с выходным напряжением 36 В и максимальным выходным током 5.9А стоимостью 2900 руб.

Стоимость данного узла из двигателя, драйвера и источника питания будет складываться из цен каждого отдельного блока. Стоимость двигателя ST57-100 – 3728руб, стоимость драйвера – 6780 руб., стоимость источника питания – 2900 руб. Итого – 13408 руб.

2.1.1 Узел с номинальной мощностью двигателя около 500Вт.

В качестве примера двигателя мощности около 500 Вт возьмем модель ST86-150. Он имеет мощность 520Вт, крепежный размер фланца 86 мм (NEMA 34), максимальный момент – 9,5 Нм, максимальный ток 5,6 А, индуктивность 5,6 мГн.

Рекомендованным производителем драйвером для этого двигателя является модель DMA860E производства Leadshine.

Этот драйвер поддерживает питание постоянным и переменным током, обеспечивает автоматическое подавление резонанса, мультистеппинг, плавный пуск мотора, имеет защиты от короткого замыкания, переплюсовки напряжения питания, превышения напряжения.

Его технические характеристики представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Технические характеристики драйвера LEADSHINE DMA860E

Параметр	Значение
Подходящие двигатели	2х-фазный ШД
Ток, I	6.0 А
Ток пиковый	7.2 А
Напряжение, U	20-80 Vac 30-100 Vdc
Управление	STEP/DIR
Частота импульсов	200 кГц
Микрошаг	до 1/256
Доп. функции	подавление резонанса мультистеппинг
Защиты	от превышения тока(КЗ) от превышения напряжения от переплюсовки(настр.)
Габаритные размеры	151 x 97 x 57 мм

Его внешний вид показан на рисунке 29, а габариты - на рисунке 30

Внешний вид разъемов драйвера показан на рисунке 31.

Назначение выводов разъемов P1 и P2 приведено в таблицах 11 и 12 соответственно.



Рисунок 29 – Внешний вид драйвера LEADSHINE DMA860E

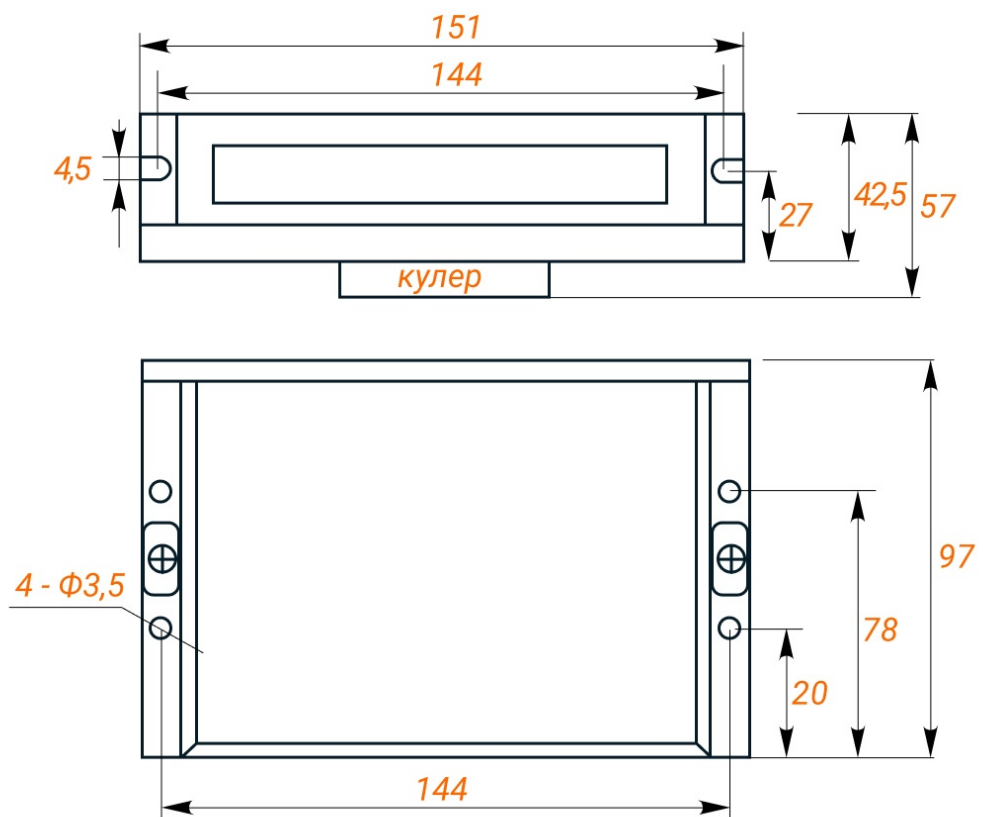


Рисунок 30 – Габаритные размеры драйвера LEADSHINE DMA860E.

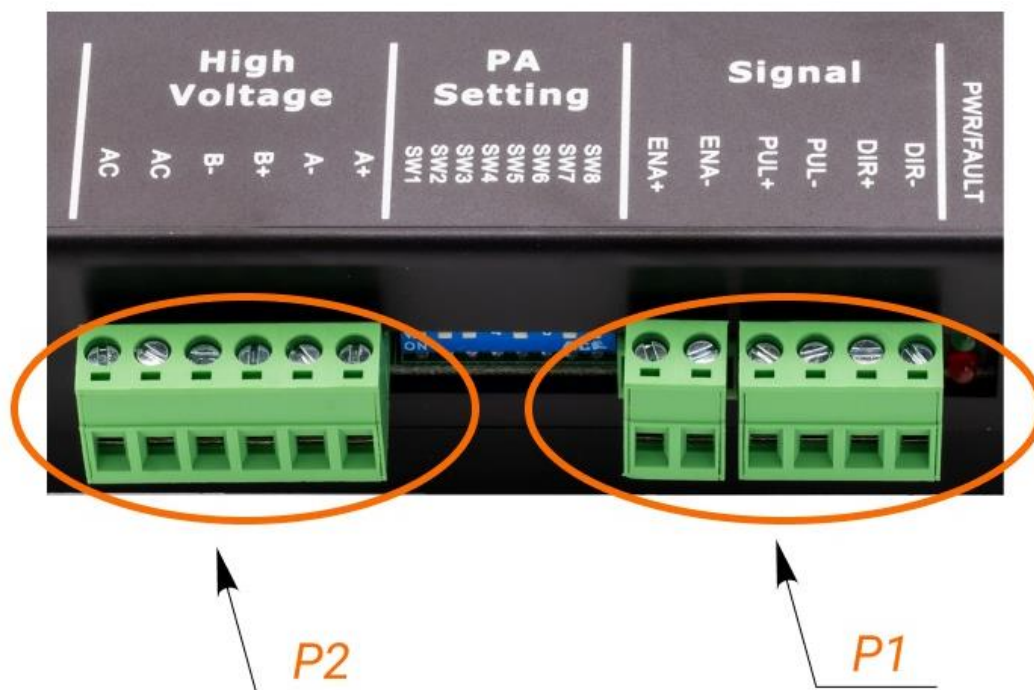


Рисунок 31 – Внешний вид разъемов драйвера LEADSHINE DMA860E.

Таблица 11 – Назначение выводов разъема P1.

Пин	Описание
PUL+	Импульсный сигнал шага (STEP), активный нарастающий фронт. Высокий уровень 4-5 вольт, низкий уровень 0-0.5. Минимальная длительность импульса 2.5 мкс. При напряжении сигналов 12/24 В используйте токоограничивающий резистор на 1/2 кОм.
PUL-	
DIR+	Сигнал направления (DIR), регулирует низким/высоким уровнем напряжения направление вращения двигателя. Минимальное время установки направления 5.0 мкс. Направление вращения можно также изменить, поменяв местами провода одной фазы (например, А + и А-). При напряжении сигналов 12/24 В используйте токоограничивающий резистор на 1/2 кОм.
DIR-	
ENA+	Сигнал включения/выключения привода. При NPN-схеме высокий уровень включает привод, низкий - отключает. При дифференциальной и PNP-схеме низкий уровень включает привод, высокий - отключает. По умолчанию контакт "ENA" неподключен (привод включен)
ENA-	

Таблица 12 – Назначение выводов разъема P2

Пин	Описание
АС	Подключение питания 18-80 В переменного тока или (без учета полярности) 24-110 вольт постоянного тока
АС	
А+	Контакт А+ фазы А двигателя
А-	Контакт А- фазы А двигателя
В+	Контакт В+ фазы В двигателя
В-	Контакт В- фазы В двигателя

Изобразим электрические соединения между шаговым двигателем и драйвером с учетом необходимых дополнительных узлов и элементов в случае необходимости (рисунок 32).

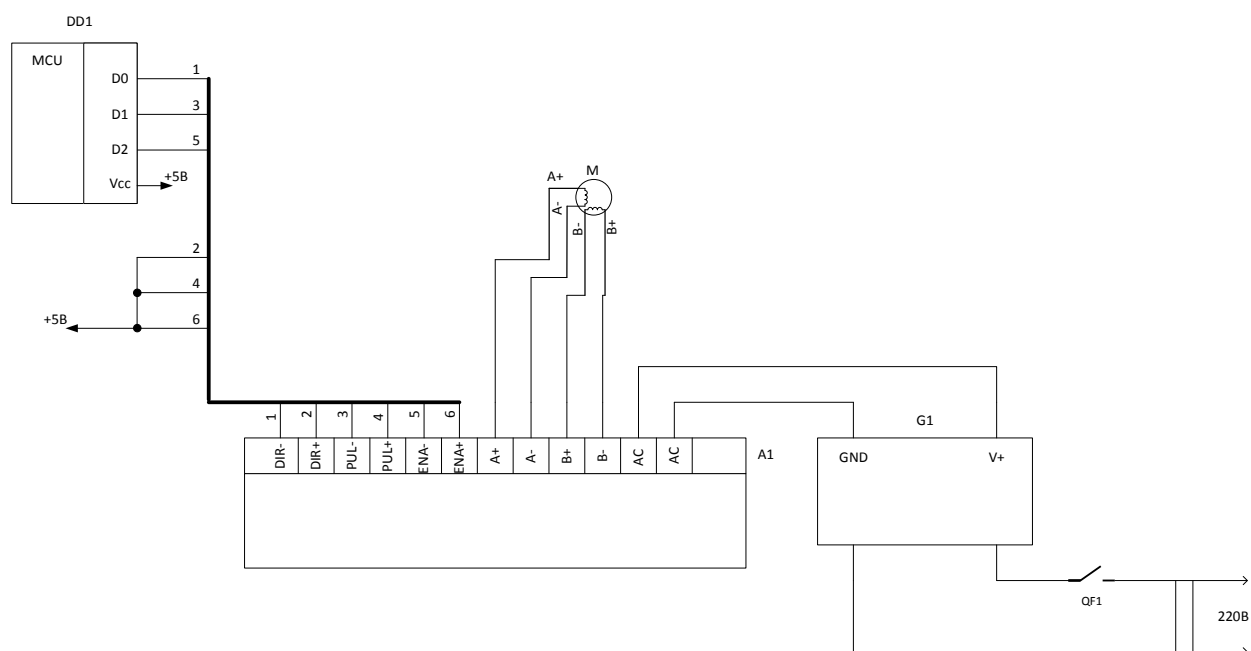


Рисунок 32 – Схема соединения двигателя ST86-150, драйвера LEADSHINE DMA860E и подключение к управляющему микроконтроллеру с питанием +5В.

При подключении в качестве управляющего устройства программируемого логического контроллера (ПЛК), питающегося от напряжения +24В, в схему необходимо добавить токоограничивающие

резисторы на информационные входы драйвера. Тогда схема подключения будет выглядеть, как показано на рисунке 33.

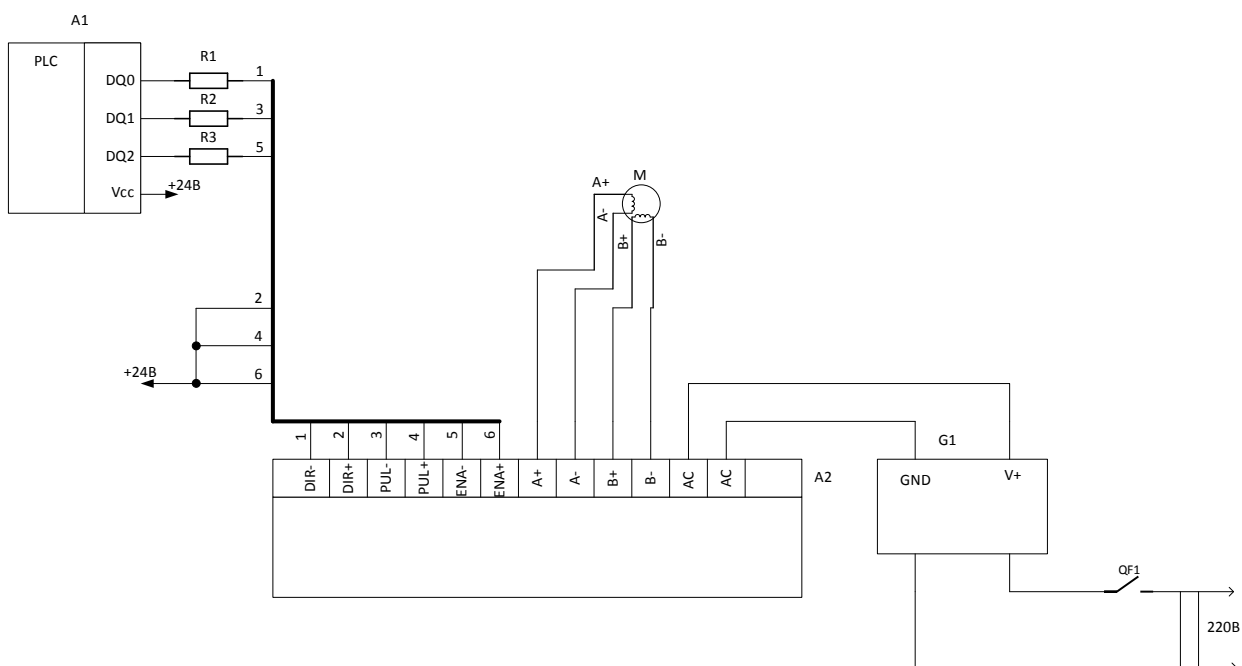


Рисунок 33 - Схема соединения двигателя ST86-150, драйвера LEADSHINE DMA860E и подключение к управляющему микроконтроллеру с питанием +24В.

Сопротивления резисторов R1-R3 принимаем равными 2кОм в соответствии с указаниями разработчика [23]. Источник питания G1 должен обеспечивать выдачу тока больше, чем максимальный ток, потребляемый двигателем, с учетом тока, потребляемого собственно схемой драйвера.

Максимальный ток двигателя ST86-150 5.2А. Заложив запас не менее 20% определим, что ток, отдаваемый источником питания должен быть не менее 6,8 А.

Двигатель работает с питающим напряжением в диапазоне 30-100В. Чем выше величина напряжения, тем выше скорость вращения вала двигателя. Однако при этом увеличивается степень нагрева, как самого двигателя, так и питающего его драйвера.

Выбираем источник питания POWERDC S-600-70 [24] с выходным напряжением 70 В и максимальным выходным током 8.6А стоимостью 13011 руб.

Стоимость данного узла из двигателя, драйвера и источника питания будет складываться из цен каждого отдельного блока. Стоимость двигателя ST86-150 – 12620 руб., стоимость драйвера – 10230руб., стоимость источника питания – 13011 руб. Итого – 35861 руб.

2.1.2 Узел с номинальной мощностью двигателя около 1000Вт.

В качестве двигателя возьмем модель ST130-250С мощностью 910 Вт с максимальным током фазы 8,0 А, моментом 35Нм и индуктивностью 15 мГн (см. таблицу 13).

Таблица 13 – Параметры двигателя ST130-250С

Параметр	Значение
Тип двигателя	2х-фазный ШД
Фланец	130 мм (NEMA 51)
Момент удержания	35 Нм
Ток фазы	8.0 А
Длина корпуса	219 мм
Шаг	1.8° (200 шагов/об)
Сопротивление обмотки	1.3 мОм
Индуктивность	15 мГн
Рабочая температура	0..85°C

Рекомендуемым для использования совместно с этим двигателем драйвером, является модель DM2282V2 производства LEADSHINE.

Эта модель является цифровым настраиваемым драйвером шагового двигателя. Он позволяет питаться переменным напряжением 200В, подавлять резонанс в двигателе, выполнять автоматическую подстройку под двигатель, сохранять конфигурации для 16 видов двигателей, обладает функцией мультистеппинга, обеспечивает плавный пуск двигателя, предоставляет защиту от короткого замыкания, переплюсовки и превышения напряжения, имеет настройку микрошага до 1:512.

Его технические характеристики представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Технические характеристики драйвера LEADSHINE DM2282V2

Параметр	Значение
Подходящие двигатели	2х-фазный ШД
Ток, I	5.9 А
Ток пиковый	8.2 А
Напряжение, U	~220 В, 1 фаза; 50/60 Гц
Управление	STEP/DIR, CW/CCW
Частота импульсов	200 кГц
Микрошаг	до 1/512
Доп. функции	подавление резонанса мультистеппинг
Защиты	От превышения напряжения От КЗ От неправильного подключения фаз
Габаритные размеры	200x137x81 мм

Его внешний вид показан на рисунке 34, а габариты - на рисунке 35.

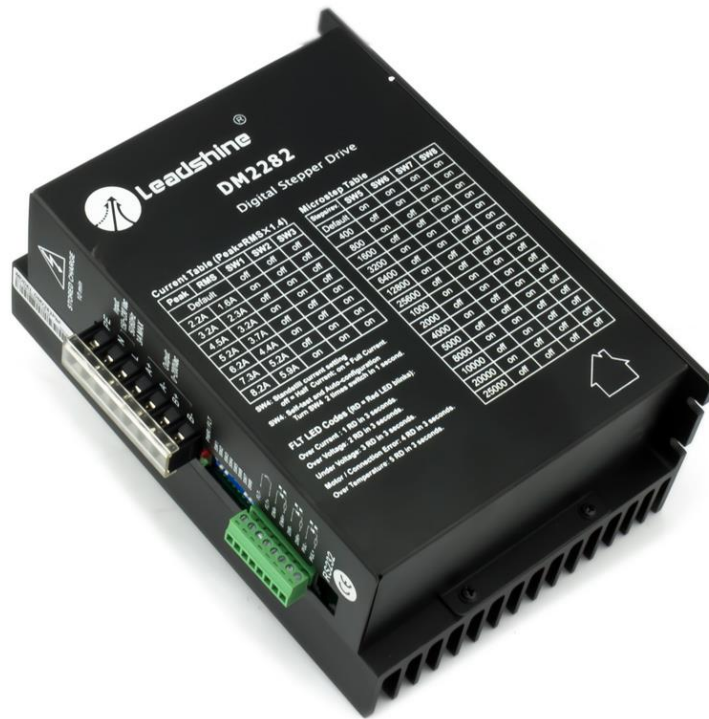


Рисунок 34 – Внешний вид драйвера LEADSHINE DM2282V2

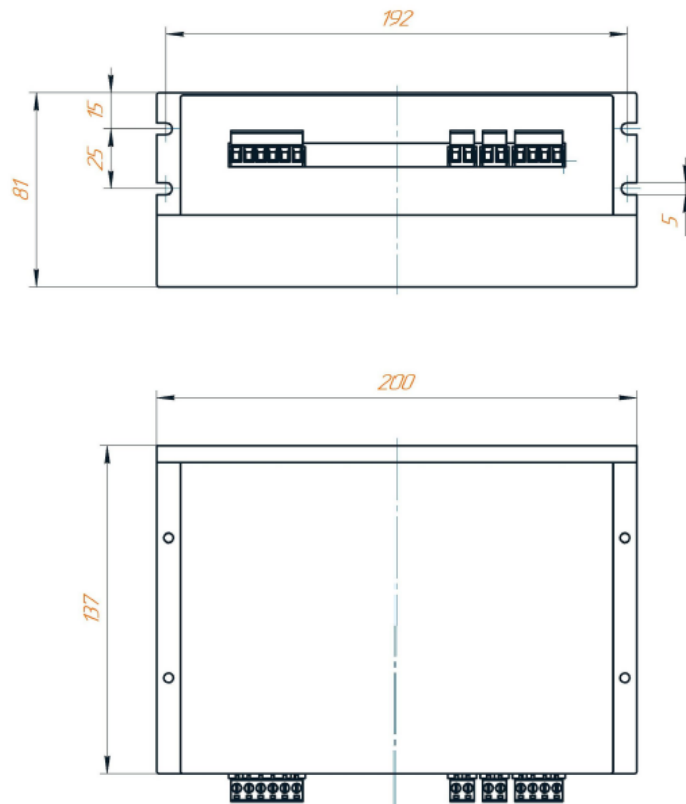


Рисунок 35 – Габаритные размеры драйвера LEADSHINE DM2282V2.

Назначение выводов разъемов P1 и P2 приведено в таблицах 15 и 16 соответственно.

Таблица 15 – Назначение выводов разъема P1.

Пин	Описание
PUL+	В режиме STEP/DIR – вход сигнала шага STEP (срабатывание по переднему или заднему фронту сигнала). В режиме CW/CCW – вход сигнала CW (срабатывание на обоих фронтах). В случае уровней напряжения 12 и 24 В требуется использовать токоограничивающий резистор. Для стабильной обработки сигнала его длительность должна быть не менее 5 мкс.
PUL-	
DIR+	В режиме STEP/DIR – вход сигнала направления DIR (срабатывание по переднему или заднему фронту сигнала). В режиме CW/CCW – вход сигнала CCW (срабатывание на обоих фронтах). В случае уровней напряжения 12 и 24 В требуется использовать токоограничивающий резистор. Для стабильной обработки сигнала его длительность должна быть не менее 5 мкс.
DIR-	
FLT+	Сигнал ошибки. Выход типа «открытый коллектор». Напряжение 24 В, ток до 20 мА. Активируется при срабатывании защиты драйвера или аварийной остановке вала. Активный уровень сигнала программируется через ПО ProTuner (по умолчанию активный высокий уровень).
FLT	
ENA+	Сигнал ENABLE активности драйвера. Высокий уровень (NPN) сигнала активирует драйвер, низкий деактивирует (запрещает управление двигателем).
ENA-	

Таблица 16 – Назначение выводов разъема P2

Пин	Описание
АС	Подключение питания
АС	
РЕ	Защитное заземление
А+	Контакт А+ фазы А двигателя
А-	Контакт А- фазы А двигателя
В+	Контакт В+ фазы В двигателя
В-	Контакт В- фазы В двигателя

Изобразим (рисунок 36) электрические соединения между шаговым двигателем и драйвером с учетом необходимых дополнительных узлов и элементов в случае необходимости.

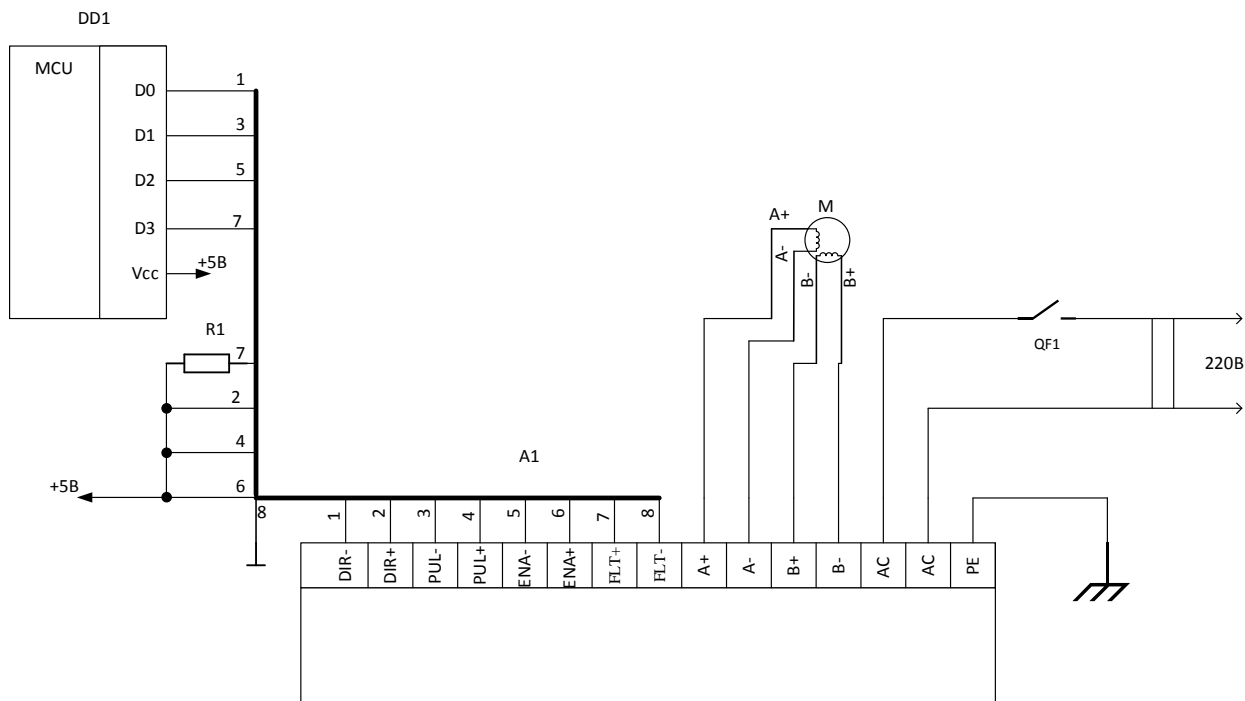


Рисунок 36 – Схема соединения двигателя ST130-250С, драйвера LEADSHINE DM2282V2 и подключение к управляющему микроконтроллеру с питанием +5В.

При подключении в качестве управляющего устройства программируемого логического контроллера (ПЛК), питающегося от напряжения +24В, в схему необходимо добавить токоограничивающие резисторы на информационные входы драйвера. Тогда схема подключения будет выглядеть, как показано на рисунке 37.

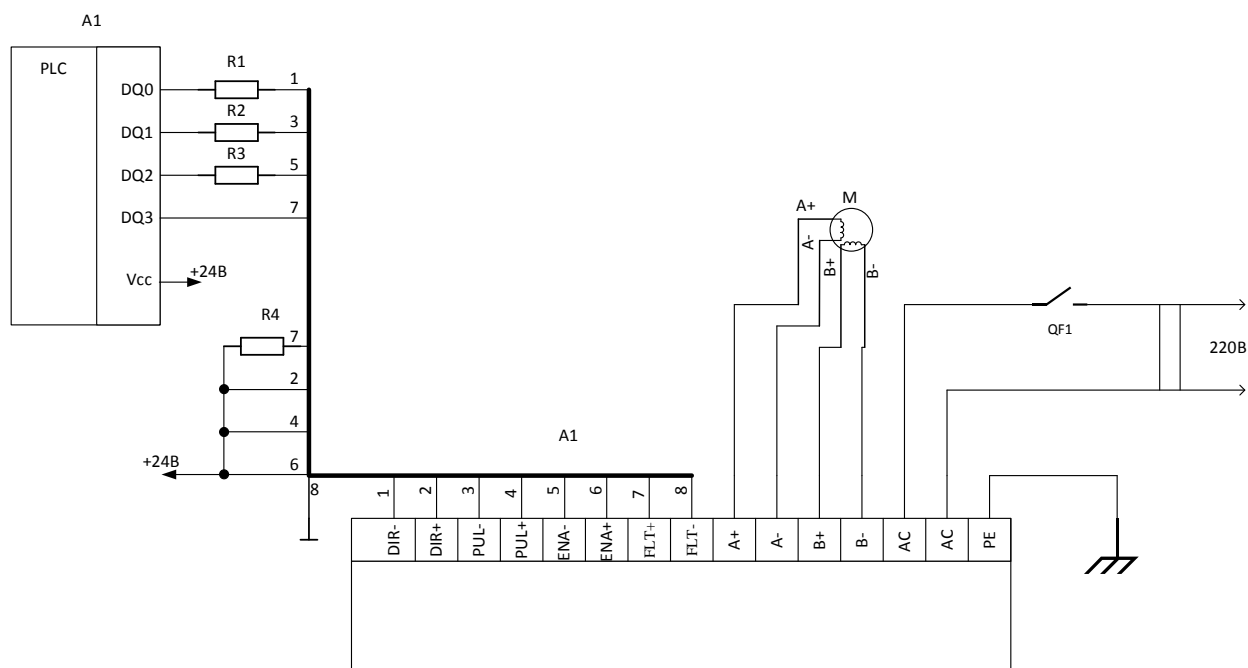


Рисунок 37 - Схема соединения двигателя ST130-250С, драйвера LEADSHINE DM2282V2 и подключение к управляющему микроконтроллеру с питанием +24В.

Сопротивления резисторов R1-R3 принимаем равными 2кОм в соответствии с указаниями разработчика [Драйверы шаговых двигателей серии DM-E. Руководство по эксплуатации. // Darxton / www.darxton.ru]. Источник питания G1 должен обеспечивать выдачу тока больше, чем максимальный ток, потребляемый двигателем, с учетом тока, потребляемого собственно схемой драйвера.

Максимальный ток двигателя ST130-250С 5.2А. Заложив запас не менее 20% определим, что ток, отдаваемый источником питания должен быть не менее 6,8 А.

Двигатель работает с питающим напряжением в диапазоне 30-100В. Чем выше величина напряжения, тем выше скорость вращения вала двигателя. Однако при этом увеличивается степень нагрева, как самого двигателя, так и питающего его драйвера.

Поскольку драйвер DM2282V2 питается от сети 220В 50 Гц, т.е. содержит в своем составе источник питания, то в состав узла в данной комбинации отдельный источник питания не включаем.

Стоимость данного узла из двигателя и драйвера будет складываться из цен каждого отдельного блока. Стоимость двигателя ST130-250С – 26300 руб., стоимость драйвера – 26640 руб. Итого – 52940 руб.

2.2 Приводные узлы на основе вентильных двигателей

Подберем три варианта вентильных (бесколлекторных) двигателей и драйверов к ним в диапазоне мощностей 100-900Вт.

В качестве примера двигателей из указанного диапазона, продающихся в настоящий момент можно выбрать модели 57BLY-1030NBV (мощность 103Вт), 86BLF-5030NBV (мощность 500Вт) и 80BLF-7530NBV (мощность 750Вт).

Их технические характеристики приведены в таблице 17.

В соответствии с рекомендациями производителя выбираем для управления двигателями драйверы BLD120A и BLDH750. Их технические характеристики сведены в таблице 18.

Схема подключения двигателя к драйверу и микроконтроллеру с питанием +5В, показана на рисунке 38.

Схема соединений между драйвером, ПЛК и двигателем показана на рисунке 39.

Таблица 17 – Технические характеристики вентильных двигателей.

Модель	57BLY-1030NBB	86BLF-5030HBB	80BLF-7530HBB
Номинальная мощность	103 Вт	500 Вт	750 Вт
Напряжение	24 В постоянного тока	310 В постоянного тока	310 В постоянного тока
Сопротивление обмоток	0.5 Ом	4.6 Ом	6.5 Ом
Индуктивность	-	-	34 мГн
Крутящий момент	0.33 Нм	1.6 Нм	2.5 Нм
Скорость	3000 об/мин	3000 об/мин	3000 об/мин
Фланец	57 мм	86 мм	80 мм
Длина	87 мм	108 мм	164 мм
Драйвер для управления	BLD120A/BLD300B	BLDH750	BLDH750
Цена, руб	4506	13810	13850

Таблица 18 - Технические характеристики драйверов двигателей.

Параметр	Значение	
Модель	BLD120A	BLDH750
Напряжение питания, В	12-30	18-52
Ток обмотки не более, А	8	25
Мощность мотора до, Вт	120	750
Рабочая температура, °С	-20 - +85	-20 - +85
Управление аналоговым сигналом, В	0...5	0..5
Диапазон скоростей, об/мин	0-3000	0-3000
Тип мотора	Двигатель постоянного тока	Двигатель постоянного тока
Поддерживаемые сигналы	STEP/DIR, SW/CCW	STEP/DIR, SW/CCW

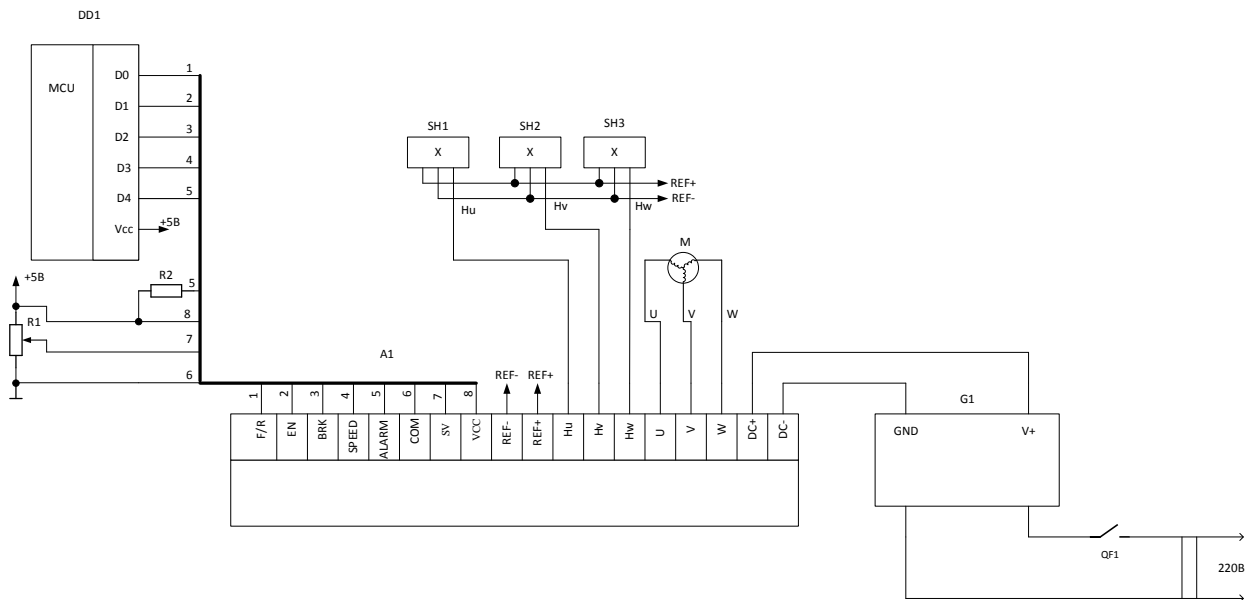


Рисунок 38 – Схема подключения двигателя к драйверу и микроконтроллеру с питанием +5В

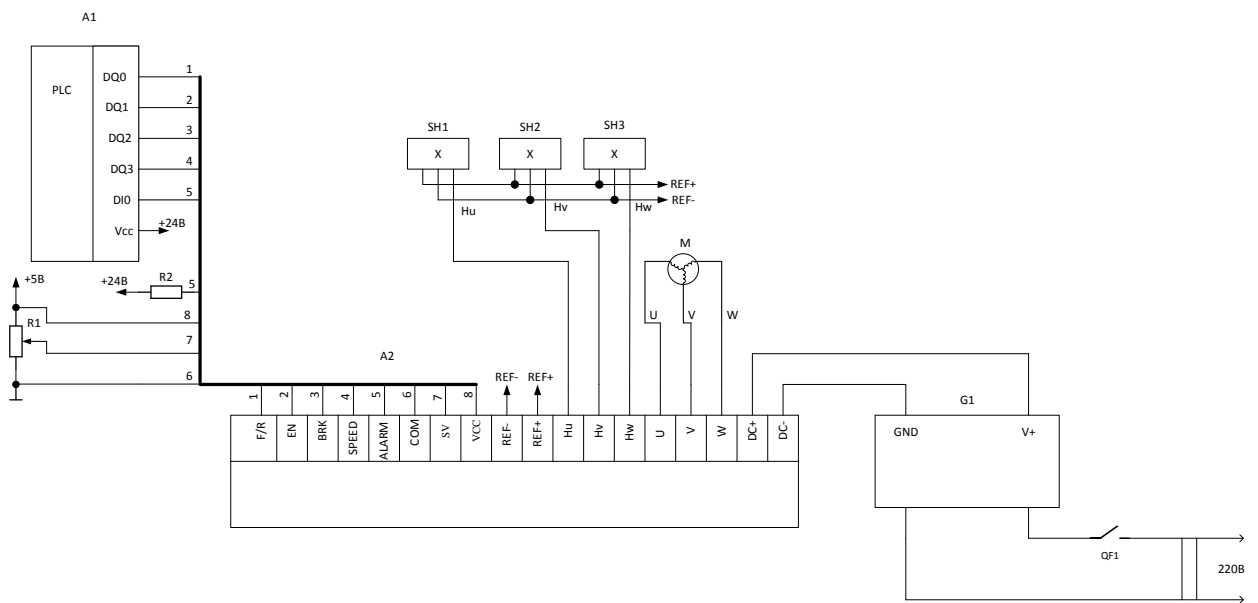


Рисунок 39 – Схема соединений между драйвером, ПЛК и двигателем

На схемах также показаны датчики Холла SH1-SH3, а также блок питания постоянного тока G1.

Для питания драйвера и двигателя необходимы источники питания. Для питания пары из двигателя 57BLY-1030NBV (103Вт) и драйвера

BLD120A выбираем источник питания S-150-24 стоимостью 2652 руб. с параметрами, приведенными в таблице 19.

Таблица 19 – Технические характеристики источника питания S-150-24

Параметр	Значение
Серия	S
Мощность	150 Вт
Выходное напряжение	24 В
Ток выхода	6.1 А
Напряжение питания	~220В
Пульсация вых. напряжения	±1%
Размер	199 x 99 x 38 мм
Наработка на отказ	-
КПД	86%
Температура среды	-40...+85°C
Влажность среды	< 90%
Охлаждение	активное(вентилятор)
Защиты	от перегрузки по току (55.2 ~ 64.8V) превышения напряжения (110-150%)
Сопротивление изоляции	500В / 100 Мом
Частота преобразования	25 кГц

Для питания пары двигатель 86BLF-5030HBV (мощность 500Вт) и драйвер BLDH750 выбираем источник питания GY800W-48-A ценой 9875 руб. со следующими техническими параметрами (таблица 20).

Таблица 20 – Технические характеристики источника питания GY800W-48-A

Параметр	Значение
Серия	GY
Мощность	0.8 кВт
Выходное напряжение	48 В
Ток выхода	20.0 А
Напряжение питания	~170...260 В, 1 фаза 47...63 Гц
Пульсация вых. напряжения	< 100 мВ
Размер	250 x 132 x 70 мм
Наработка на отказ	50 000 часов
КПД	83%
Температура среды	-10...+50°C
Влажность среды	< 90%
Охлаждение	активное (2 вентилятора)
Защиты	от перегрузки по току (120-170%) превышения напряжения (120-150%)

Для питания пары мотор 80BLF-7530НВВ (мощность 750Вт) и драйвер BLDH750 выберем источник питания GY1200W-160-A стоимостью 10750 руб, технические характеристики которого сведены в таблицу 21.

После подбора всех узлов определим стоимость каждого комплекта и сведем в таблицы 22 – 24.

Таблица 21 – Технические характеристики источника питания GY1200W-160-A

Параметр	Значение
Серия	GY
Мощность	1.2 кВт
Выходное напряжение	130...160 В
Ток выхода	9 А
Напряжение питания	220 В
Пульсация вых. напряжения	< 100 мВ
Размер	
Наработка на отказ	50 000 часов
КПД	
Температура среды	-10...+40°C
Влажность среды	< 90%
Охлаждение	активное (2 вентилятора)
Защиты	от перегрузки по току (120-170%) превышения напряжения (120-150%)

Таблица 22 – Комплект 1

Узел	Цена, руб
Двигатель 57BLY-1030NBV	4506
Драйвер BLD120A	7960
Источник питания S-150-24	2652
Итого	15118

Таблица 23 – Комплект 2

Узел	Цена, руб
Двигатель 86BLF-5030NBV	13810
Драйвер BLDH750	6110
Источник питания GY800W-48-A	9875
Итого	29795

Таблица 24 – Комплект 3

Узел	Цена, руб
Двигатель 80BLF-7530HBB	13850
Драйвер BLDH750	6110
Источник питания GY1200W-160-A	10750
Итого	30710

Таким образом, мы сформировали три группы комплектов на основе бесколлекторных двигателей для трех групп мощностей: 100Вт, 500Вт и 750 Вт, состоящих из двигателя, драйвера и источника питания для них.

Заключение

Целью данной работы является анализ рынка оборудования на предмет наличия и распространенности двигателей в диапазоне мощностей от 100 Вт до 900 Вт, а также построение схем подключения шаговых и вентильных двигателей, их драйверов и контроллеров, представленных двумя типами: микроконтроллеров и ПЛК (программируемая логика контроллеры).

В первой части итоговой работы описаны конструкции, принципы работы, основа линейных шаговых и вентильных двигателей мощностью 100-900 Вт.

Во второй части работы проводится анализ рассматриваемого вопроса. Рассматриваются доступность, ассортимент, распространенность, экономические показатели и возможные конфигурации, необходимые для создания 3D-принтеров.

В результате выполнения выпускной квалификационной работы был проведен обзор предложенных шаговых и вентильных двигателей, а также отдельно рассмотрены их драйверы и контроллеры на рынке на момент написания ВКР.

Выбраны комплекты оборудования из диапазона мощностей двигателей 100-900Вт, выполнены схемы соединений шаговых и вентильных двигателей с драйверами и контроллерами двух типов: микроконтроллерами и ПЛК.

Рассчитана стоимость различных комплектов, составленных из шаговых или вентильных двигателей, драйверов для них и источников питания. Вычисления сгруппированы в соответствующие таблицы.

Таким образом, задачи, поставленные в задании на выполнение ВКР, выполнены полностью.

В заключение хотелось бы подчеркнуть, что материалы по этой выпускной квалификационной работе актуальны из-за растущего спроса на альтернативные методы создания продуктов и будут представлять интерес

для отдельных лиц и компаний, заинтересованных в интеграции технологий 3D-принтеров в их производство.

Список используемой литературы

1. BLDC мотор-редукторы Fulling Motor, серия BL Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]: Purelogic research&development. URL: <https://purelogic.ru/news/bldc-elektroprivodnyj-motor-reduktory-i-privody-fulling-motor/> (дата обращения: 05.05.2022)
2. Бесколлекторные (BLDC) электродвигатели [Электронный ресурс]: Purelogic R&D. URL: https://purelogic.ru/catalog/elektroprivod/beskollektornye_elektroprivodnyj_bldc/filter/moschnost_vt-is-t103-or-t110-or-t125-or-t138-or-t141-or-t153-or-t157-or-t184-or-t188-or-t220-or-t314-or-t330-or-t440-or-t471-or-t500-or-t600-or-t660-or-t750-or-t942/apply/ (дата обращения: 20.04.2022)
3. Бесколлекторные электродвигатели, серия BLF и BLM. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]: Purelogic research&development. URL: https://purelogic.ru/catalog/elektroprivod/beskollektornye_elektroprivodnyj_bldc/ (дата обращения: 05.05.2022)
4. Вентильный двигатель. [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Вентильный_двигатель (дата обращения: 20.04.2022)
5. Вентильный двигатель: конструкция, принцип работы, классификация [Электронный ресурс]: Информационный интернет-сайт “ASUTPP”. URL: <https://www.asutpp.ru/ventilnyj-dvigatel.html> (дата обращения: 20.04.2022)
6. Драйвер BLDC-4008 [Электронный ресурс]: Purelogic R&D. URL: <https://purelogic.ru/catalog/20574/> (дата обращения: 07.05.2022)
7. Драйвер шагового двигателя. [Электронный ресурс]: Purelogic R&D. URL:

http://wiki.purelogic.ru/index.php?title=Драйвер_шагового_двигателя (дата обращения: 14.04.2022)

8. Драйверы шаговых двигателей серии DM-E. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]: Darxton. URL: www.darxton.ru (дата обращения: 08.05.2022)

9. Источник питания импульсный S-600-70 [Электронный ресурс]: Darxton. URL: <https://purelogic.ru/catalog/22394/> (дата обращения: 08.05.2022)

10. Как работает шаговый электродвигатель? [Электронный ресурс]: Информационный интернет-сайт “ASUTPP”. URL: <https://www.asutpp.ru/shagovyy-dvigatel.html> (дата обращения: 07.04.2022)

11. Контроллер шагового двигателя. [Электронный ресурс]: Darxton. URL: <https://darxton.ru/wiki-article/kontroller-shagovogo-dvigatelya/> (дата обращения: 16.04.2022)

12. Контроллеры NC STUDIO [Электронный ресурс]: Darxton. URL: https://darxton.ru/catalog_section/kontrollery-chpu-nc-studio/ (дата обращения: 18.04.2022)

13. Контроллеры бесколлекторных двигателей. [Электронный ресурс]: Электроприводы. URL: <https://electroprivod.ru/bls-drivers.htm> (дата обращения: 05.05.2022)

14. Контроллеры шаговых двигателей. [Электронный ресурс]: Электропривод. URL: https://electroprivod.ru/st_motor-controllers.htm (дата обращения: 15.04.2022)

15. Масленников М.Ю., Соболев Е.А. Справочник разработчика и конструктора РЭА. Элементная база. Справочник. - М.: Энергоатомиздат, 1993. - 298 с

16. Модуль контроллера вентильного двигателя мквд. Паспорт. // Предл.№30-18; 14-20/ АО «Электрум АВ»

17. Основные технические особенности вентильных двигателей. [Электронный ресурс]: Сетевое издание «Elec.ru». URL:

<https://www.elec.ru/publications/promyshlennoe-oborudovanie/2225/> (дата обращения: 20.04.2022)

18. Резонанс шагового двигателя. [Электронный ресурс]: StepMotor — промышленная автоматика в России. URL: https://stepmotor.ru/резонанс_шагового_двигателя (дата обращения: 08.04.2022)

19. Шаговые двигатели биполярные. [Электронный ресурс]: Darxton. URL: https://darxton.ru/catalog_section/bipolyarnye-shagovye-dvigateli/ (дата обращения: 12.04.2022)

20. Шаговые двигатели. [Электронный ресурс]: Purelogic R&D. URL: https://purelogic.ru/catalog/elektroprivod/shagovye_dvigateli/filter/flanec-is-tnema_43_110mm-or-tnema_52_130mm/apply/ (дата обращения: 12.04.2022)

21. Шаговый двигатель. [Электронный ресурс]: Инженерные решения - просветительский проект. URL: <https://engineering-solutions.ru/motorcontrol/stepper/> (дата обращения: 08.04.2022)

22. Шаговый электродвигатель [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Шаговый_электродвигатель (дата обращения: 07.04.2022)

23. Элементы теории вентильного двигателя. [Электронный ресурс]: ЛУКОЙЛ ЭПУ Сервис. URL: https://lukoil-epu.ru/BLDC/theory__ (дата обращения: 20.04.2022)

24. Ю.Н. Андреев, А.И. Антонян, Д.М. Иванов и др.; Под ред. И.И. Четверткова Резисторы(справочник) – М. Энергоиздат, 1981.- 352 с.

25. 3D printing [Электронный ресурс]: Wikipedia. The Free Encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing (дата обращения: 15.04.2022)

26. 3D printing scales up [Электронный ресурс]: The Economist Newspaper Limited 2022. URL: <https://www.economist.com/technology-quarterly/2013/09/05/3d-printing-scales-up> (дата обращения: 15.04.2022)

27. Electric motor [Электронный ресурс]: Wikipedia. The Free Encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_motor#References (дата обращения: 15.04.2022)

28. Factors to Consider When Choosing a 3D Printer [Электронный ресурс]: ASTM International. All Rights Reserved. URL: <https://wohlersassociates.com/NovDec05TCT3dp.htm> (дата обращения: 15.04.2022)

29. How Much Does a 3D Printer Cost? [Электронный ресурс]: 3DInsider. All Rights Reserved. URL: <https://3dinsider.com/cost-of-3d-printer/> (дата обращения: 15.04.2022)