

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)

11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электроника и робототехника

(направленность (профиль) / специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему «Узел однокоординатного перемещения объекта мощностью 10 Вт на основе микроконтроллера»

Студент

О.Г. Мубораккадамов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

А.К. Кудинов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультант

к.ф.н, доцент, М.М. Бажутина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Тольятти 2022

## **Аннотация**

Название бакалаврской работы: «Узел однокоординатного перемещения объекта мощностью 10 Вт на основе микроконтроллера».

Выпускная работа состоит из введения, трех разделов, заключения, таблиц, списка литературы, включая зарубежные источники, и графической части на 6 листах формата А1.

Ключевым вопросом выпускной работы является повышение точности позиционирования объекта, в частности, печатающей головки 3D-принтера. Для этого необходимо провести обзор имеющихся аналогов, в том числе шаговых и вентильных двигателей с диапазоном мощности от 10 до 100 Вт, рассмотреть их конструкцию, принцип действия, системы управления; подобрать несколько комплектов совместимого (согласованного по параметрам) оборудования для выполнения перемещения вдоль одной координаты; оценить стоимость подобранных комплектов оборудования.

Целью бакалаврской работы является подборка нескольких комплектов электроприводов, в основе которых лежат микродвигатели различных типов, для выполнения перемещения рабочего органа объекта, в частности, печатающей головки 3D-принтера, вдоль одной координаты.

Выпускная работа может быть разделена на следующие логически взаимосвязанные части: введение, краткие сведения об известных конструкциях узлов однокоординатного перемещения объекта на основе микроконтроллера, выбор рабочего варианта, разработка нескольких различных комплектов электроприводов, их сравнение и формирование рекомендаций по применению.

Подводя итоги, мы бы хотели подчеркнуть, что данная работа актуальна не только для 3D принтеров, но и других объектов, с одно или многокоординатным перемещением рабочих органов.

## **Abstract**

Title of the bachelor's thesis: "Node for single-coordinate movement of an object with a power of 10 W based on a microcontroller."

The final work consists of an introduction, three sections, conclusion, tables, list of references, including foreign sources, and a graphic part on 6 sheets of A1 format.

The key issue of the final work is to increase the accuracy of object positioning, in particular, the print head of a 3D printer. To do this, it is necessary to review the available analogues, including stepper and valve motors with a power range from 10 to 100 W, to consider their design, principle of operation, control systems; pick up several sets of compatible (matched in terms of parameters) equipment to perform movement along one coordinate; estimate the cost of selected sets of equipment.

The purpose of the bachelor's work is to select several sets of electric drives, which are based on micromotors of various types, to move the working body of an object, in particular, the print head of a 3D printer, along one coordinate.

Graduation work can be divided into the following logically interrelated parts: introduction, brief information about the known designs of nodes for single-coordinate movement of an object based on a microcontroller, the choice of a working option, the development of several different sets of electric drives, their comparison and the formation of recommendations for use.

Summing up, we would like to emphasize that this work is relevant not only for 3D printers, but also for other objects with one or multi-coordinate movement of working bodies.

## Содержание

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                                          | 6  |
| 1 Состояние вопроса .....                                                                              | 8  |
| 1.1 Электрические привода, применяемые для однокоординатного<br>перемещения объектов .....             | 8  |
| 1.2 Шаговые двигатели.....                                                                             | 15 |
| 1.2.1 Конструкция и принцип действия шаговых двигателей.....                                           | 15 |
| 1.2.2 Ассортимент шаговых двигателей на мощности от 10 до 100 Вт .....                                 | 16 |
| 1.2.3 Драйверы для питания обмоток шаговых двигателей .....                                            | 17 |
| 1.2.4 Контроллеры управления шаговыми двигателями и их<br>возможности .....                            | 22 |
| 1.3 Вентильные двигатели.....                                                                          | 24 |
| 1.3.1 Конструкция и принцип действия вентильных двигателей .....                                       | 24 |
| 1.3.2 Ассортимент вентильных двигателей на мощности от 10 до 100 Вт .....                              | 27 |
| 1.3.3 Драйверы для питания обмоток вентильных двигателей .....                                         | 28 |
| 1.3.4 Контроллеры управления вентильными двигателями и их<br>возможности .....                         | 30 |
| 1.4 Задачи бакалаврской работы.....                                                                    | 32 |
| 2 Разработка узла однокоординатного перемещения объекта .....                                          | 33 |
| 2.1 Узел на основе контроллера SMSD-1.5Modbus с шаговым двигателем<br>FL42STH.....                     | 33 |
| 2.2 Узел на основе контроллера ECSON Module 24/2 с вентильным<br>двигателем ECX SPEED 13M.....         | 35 |
| 2.3 Узел на основе линейного серводвигателя ServoTube STA11 и<br>контроллера Accelnet ADP-055-18 ..... | 39 |
| 3 Сравнение и формирование рекомендаций по применению.....                                             | 42 |
| 3.1 Сравнение вариантов узлов однокоординатного перемещения по<br>сметной стоимости.....               | 42 |
| 3.2 Рекомендации по применению .....                                                                   | 45 |

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| Заключение .....                        | 46 |
| Список используемых источников .....    | 47 |
| Приложение А Шаговые двигатели .....    | 51 |
| Приложение Б Вентильные двигатели.....  | 52 |
| Приложение В Контроллеры скорости ..... | 53 |

## Введение

Устройства, подобные по выполняемым функциям современным 3D-принтерам, начали патентовать в различных странах начиная с 1980 года. Основоположником считается доктор Хидео Кодама, создатель системы быстрого прототипирования. Название говорит само за себя – подобная система была необходима для трехмерной визуализации электронных чертежей и моделей. Первый коммерческий 3D-принтер поступил в продажу в 1988 году. Это была модель SL-1 от компании 3D Systems, основателем которой был Чак Халл.

«В последние годы 3D-печать стала доступна массовому потребителю: цены на принтеры значительно сократились, а их использование стало удобнее. Фотополимерные 3D-принтеры печатают детализированные модели с высокой точностью и разрешением. Количество пользователей растет в том числе за счет огромного сообщества энтузиастов, готовых прийти на помощь новичкам. Этому способствует и наличие готовых файлов для 3D-печати и доступность программного обеспечения для создания моделей.

3D-печать становится уже стандартным решением в таких отраслях как стоматология, ювелирное дело, ортопедия, в других отраслях внедрение идет полным ходом. Перспективы бесконечны - от строительства домов до нейрохирургии, от печати шоколадом до печати металлом» [16].

В связи с популярностью печати объемных объектов, многие конструкторы разрабатывают свои уникальные 3D-принтеры, позволяющие создавать особые режимы печати, не достижимые на имеющихся в продаже образцах. К таковым можно отнести повышенную температуру внутри камеры, повышенное давление, эксперименты с нестандартными и вновь разработанными типами пластиков и т.п. При этом возникает необходимость в подборе оборудования для приводов печатающей головки различной мощности.

Несмотря на доступность 3D-принтеров, их относительно небольшую стоимость нельзя сказать, что проблем в области 3D-печати не существует. Назовем лишь некоторые из них:

- «в начале процесса печати отсутствует подача 3D-пластика;
- нарушение калибровки печатающей головки;
- засорение экструдера;
- 3D-модель не прилипает платформе, нет достаточной адгезии» [17];
- не выдерживается температурный режим и др. в том числе проблемы связанные с точностью позиционирования объекта в целом и его печатающей головки в частности.

Целью бакалаврской работы является подборка нескольких комплектов электроприводов, в основе которых лежат микродвигатели различных типов, для выполнения перемещения рабочего органа объекта, в частности, печатающей головки 3D-принтера, вдоль одной координаты.

## 1 Состояние вопроса

### 1.1 Электрические привода, применяемые для однокоординатного перемещения объектов

Электрический привод преобразует энергию электромагнитного поля в кинетическую энергию исполнительного механизма. Электропривод (ГОСТ Р 50369-92) - электромеханическая система, состоящая из преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими, управляющими и 3 информационными системами, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса (см. рис. 1).

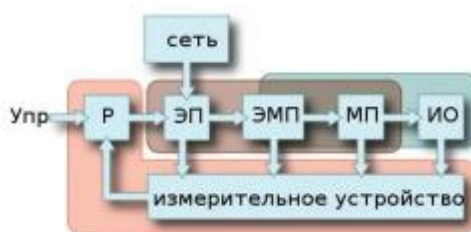


Рисунок 1 – Функциональная схема электропривода [16]

Существует несколько способов использовать электрическую энергию для получения перемещения [17].

Электрореологический (ЭР) привод.

Работает за счет того, что рабочая среда, электрореологическая жидкость (ЭРЖ) меняет свои реологические свойства при воздействии на нее внешним электрическим полем (ЭР-эффект) (см. рис. 2).

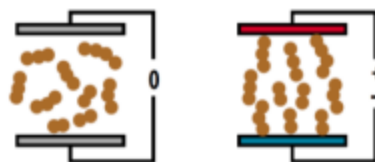


Рисунок 2 – Принцип действия ЭР-привода [17]

Магнитогидродинамический (МГД) привод.

Движение возникает, когда частицы магнитной или парамагнитной жидкости подвергаются действию сильного магнитного поля (рис. 3)

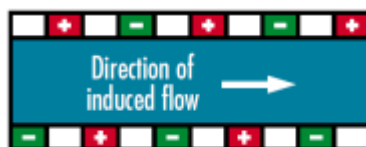


Рисунок 3 – Принцип действия магнитогидродинамического привода [17]

Привод на основе электрически-активных полимеров (ЕАП).

Электрическое поле прикладывается к ЕАП и генерирует движение среды и мобильных положительных ионов в полимерном композите (рис. 4). ЕАП деформируется в результате напряжений, создаваемых ионами.

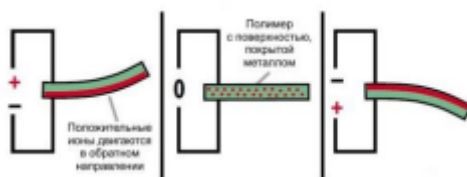


Рисунок 4 – Принцип действия привода на основе ЕАП [17]

Электростатический привод.

В результате приложения электрического поля (разности потенциалов) возникает электростатический заряд от избытка или дефицита свободных

электронов в материале. Эти заряды могут притягиваться к противоположно заряженным объектам, или отталкиваться от аналогично заряженных объектов (рис. 5).



Рисунок 5 – Схема работы электростатического привода [17]

Магнитострикционный привод (на основе материалов, обладающих магнитострикционными свойствами) (см. рис. 6).

Магнитострикционные материалы обладают очень малыми, но устойчивыми и обратимыми изменением формы при воздействии магнитных полей. Рабочие органы развивают высокие усилия, но при малых диапазонах перемещений, как правило, менее чем на 1% от начального размера. Типичные магнитострикционные материалы включают комбинации редкоземельных элементов с железом, таких как TbFe (Терфенол) и TbDyFe (Терфенол-D).



Рисунок 6 – Принцип действия магнитострикционного привода [17]

Электромагнитный привод (см. рисунок 7).

Как известно электрические и магнитные поля связаны друг с другом и одно порождает другое (уравнения Максвелла). Силы притяжения или

отталкивания, возникающие в сердечнике электромагнитной системы, пропорциональны силе тока, пропускаемой через катушку индуктивности системы. Типичные примеры электромагнитных устройств: электрический двигатель, соленоид, реле, катушки звукового динамика и электронно-лучевые трубки.



Рисунок 7 – Принцип действия электромагнитного привода [17]

Пьезоэлектрический привод.

Перемещения возникают из-за размерных изменений, возникающих в отдельных кристаллических материалах (пьезоэлектриках) при воздействии электрического поля или электрического заряда. Этот эффект носит название обратного пьезоэлектрического. Типичный пьезоэлектрический материал - кварц ( $\text{SiO}_2$ ) (см. рис. 8).

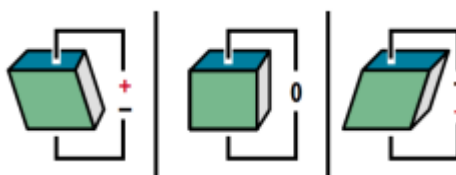


Рисунок 8 – Принцип действия пьезоэлектрического привода [17]

Примером электрического привода является компактный линейный привод – M272 (Physik Instrumente (PI), Германия) (см. рисунок 9). Это керамический прямой привод, самоблокирующийся в состоянии покоя.



Рисунок 9 – Внешний вид электрического привода M272

Привод с применением магнитореологических жидкостей.

МР-жидкости представляют собой суспензии магнитных частичек (восстановленное железо, чистое железо, кобальт, карбонильное железо, никель) размером порядка  $1 \dots 20$  мкм в жидкости-носителе. Носителем могут выступать различные жидкости, в зависимости от назначения устройства это могут быть: вода, кремнийорганическая (силиконовая) жидкость, синтетические и полусинтетические масла, минеральные масла и т.д. «Под действием магнитного поля частицы, распределенные в объеме дисперсионной среды, образуют структуры, ориентированные вдоль силовых линий поля» [1] (МР-эффект).

В МГТУ имени Н.Э. Баумана на кафедре МТ-11 разрабатываются механизмы точных перемещений и активной виброизоляции на основе указанных материалов.

Преимущества и недостатки электрического привода в сравнении с другими видами приводов (пневматический, гидравлический) показаны в табл. 1. Каждый тип привода имеет свои специфические характеристики, которые важно изучить для выбора наиболее подходящего типа линейного привода для вашего проекта.

Таблица 1 – Сравнение различных типов приводов

| Характеристики | Пневматический привод | Гидравлический привод | Электрический привод                                         |
|----------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------|
| Система        | Простая               | Умеренно сложная      | Точная система управления. Комплексное управление множеством |

Продолжение таблицы 1

| Характеристики                   | Пневматический привод                   | Гидравлический привод                                                                                  | Электрический привод                                                                                 |
|----------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                  |                                         |                                                                                                        | различных устройств.                                                                                 |
| Мощность                         | Высокая                                 | Очень высокая                                                                                          | Высокая                                                                                              |
| Управление                       | Простые клапаны                         | Требуется вмешательство пользователя                                                                   | Электрическое управление; гибкость управления обеспечивается с помощью электронного блока управления |
| Точность позиционирования        | Сложность обеспечения точного положения | Позиционирование посередине длины хода требует дополнительных компонентов и вмешательства пользователя | Возможно управление позиционированием и скоростью, что позволяет обеспечить синхронизацию            |
| Скорость                         | Очень быстрая                           | Умеренно быстрая                                                                                       | Умеренно быстрая                                                                                     |
| Возможная нагрузка               | Высокая                                 | Очень высокая                                                                                          | Можно повышать в зависимости от скорости и желаемого позиционирования                                |
| Срок службы                      | Умеренный                               | Большой                                                                                                | Большой                                                                                              |
| Ускорение                        | Очень большое                           | Очень большое                                                                                          | Умеренное                                                                                            |
| Устойчивость к ударным нагрузкам | Способна выдерживать ударные нагрузки   | Взрывозащищенность, устойчивость к ударным нагрузкам                                                   | Ограниченная способность выдерживать ударные нагрузки                                                |
| Окружающая среда                 | Повышенный уровень шума                 | Утечки и утилизация гидравлических жидкостей                                                           | Минимальное воздействие                                                                              |
| Компоненты                       | Компрессор, шланги, электрическая часть | Насос, трубопроводы, электрическая часть                                                               | Только электрическая часть                                                                           |
| КПД                              | Низкий                                  | Низкий                                                                                                 | Высокий                                                                                              |
| Надежность                       | Отличная                                | Хорошая                                                                                                | Хорошая                                                                                              |
| Объем работ по техобслуживанию   | Высокий                                 | Высокий                                                                                                | Практически не требуется                                                                             |
| Стоимость приобретения           | Низкая                                  | Высокая                                                                                                | Высокая                                                                                              |
| Эксплуатационные расходы         | Умеренные                               | Высокие                                                                                                | Низкие                                                                                               |
| Расходы на техобслуживание       | Низкие                                  | Высокие                                                                                                | Низкие                                                                                               |



Рисунок 10 – Типы электроприводов

Рассмотрим какие бывают линейные электроприводы по конструкции:

- параллельные электроприводы (см. рис. 10, а): двигатель расположен параллельно ходовому винту;
- электроприводы, расположенные под прямым углом, или Г-образные электроприводы (см. рис. 10, б): двигатель расположен перпендикулярно ходовому винту;
- соосные электроприводы (см. рис. 10, в): двигатель расположен на одной оси с ходовым винтом;
- мотор-редукторы (см. рис. 10, г);
- сдвоенные двигатели (см. рис. 10, д): обеспечивают независимое или синхронное перемещение в двух направлениях;
- ползунковые электроприводы (см. рис. 10, е): позволяют осуществлять линейное перемещение без использования внешнего цилиндра;
- электрические колонны с регулируемой высотой (см. рис. 10, и).

## **1.2 Шаговые двигатели**

### **1.2.1 Конструкция и принцип действия шаговых двигателей**

«Шаговый двигатель представляет собой электрическую машину, предназначенную для преобразования электрической энергии сети в механическую энергию. Отличительной особенностью шагового двигателя является дискретное вращение, при котором заданному числу импульсов соответствует определенное число совершаемых шагов.

К преимуществам эксплуатации шагового двигателя можно отнести:

- угол поворота соответствует числу поданных электрических сигналов, при этом, после остановки вращения сохраняется полный момент и фиксация;
- точное позиционирование – обеспечивает 3 – 5% от установленного шага, которая не накапливается от шага к шагу;
- обеспечивает высокую скорость старта, реверса, остановки;
- отличается высокой надежностью за счет отсутствия трущихся компонентов для токосъема, в отличие от коллекторных двигателей;
- для позиционирования шаговому двигателю не требуется обратной связи;
- может выдавать низкие обороты для непосредственно подведенной нагрузки без каких-либо редукторов;
- сравнительно меньшая стоимость относительно тех же сервоприводов;
- обеспечивается широкий диапазон управления скоростью оборотов вала за счет изменения частоты электрических импульсов» [23].

К недостаткам применения шагового двигателя относятся:

- может возникать резонансный эффект и проскальзывание шагового агрегата;

- существует вероятность утраты контроля из-за отсутствия обратной связи;
- количество расходуемой электроэнергии не зависит от наличия или отсутствия нагрузки;
- сложности управления из-за особенности схемы

Устройство и принцип работы ШД подробно рассматривается в различной литературе [2, 8, 12].

Типы шаговых двигателей по конструкции ротора:

- реактивный;
- с переменным магнитным сопротивлением;
- с постоянными магнитами;
- гибридные.

«Гибридный ШД является самым распространенным, так как объединяет лучших качеств двух предыдущих моделей, за счет чего агрегат обладает меньшим углом и шагом. Его ротор выполнен в виде цилиндрического постоянного магнита, который намагничен по продольной оси» [5].

По виду обмоток ШД делятся на:

- униполярные (см. рисунок 11): он отличается тем, что в схеме подключения обмотки имеется ответвление от средней точки. Благодаря чему легко меняются магнитные полюса;
- биполярные (см. рисунок 12) подключается к контроллеру через 4 вывода. При этом обмотки могут соединяться внутри как последовательно, так и параллельно.

### **1.2.2 Ассортимент шаговых двигателей на мощности от 10 до 100 Вт**

Ассортимент шаговых двигателей, их основные характеристики сведем в таблицу А.1 Приложения А.

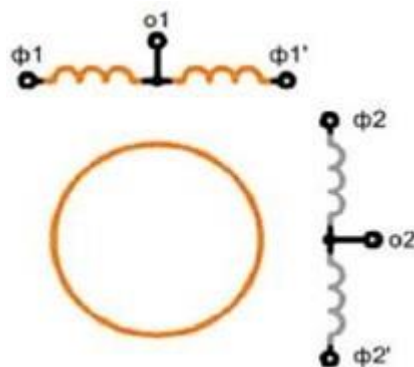


Рисунок 11 – Униполярный ШД

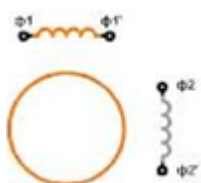


Рисунок 12 – Биполярный ШД

Производитель шаговых двигателей – Changzhou Fulling Motor Co - ведущий итало-германо-китайский концерн по производству шаговых двигателей в мире. Они являются «законодателями» моды и большинство остальных мировых производителей ШД выпускают свои модели с учетом присоединительных размеров и диаметром выходных валов этого концерна: NEMA 17, NEMA 23, NEMA 34 и т.д. и указывают данный типоразмер в скобках после обозначения своей продукции (например, 20HS42-0504A04-A24 (NEMA 8)). В приводах мощностью более 80Вт вместо шаговых двигателей применяют серводвигатели.

### 1.2.3 Драйверы для питания обмоток шаговых двигателей

«Драйвер шагового двигателя получает на входе логические сигналы STEP/DIR, которые, как правило, представлены высоким и низким уровнем

опорного напряжения 5 В, и в соответствии с полученными сигналами изменяет ток в обмотках двигателя, заставляя вал поворачиваться в соответствующем направлении на заданный угол

Задача драйвера — изменять ток в обмотках как можно более эффективно. Поскольку индуктивность обмоток и ротор гибридного шагового двигателя постоянно вмешиваются в этот процесс, то драйверы весьма отличаются друг от друга своими характеристиками и качеством получаемого движения. Ток, протекающий в обмотках, определяет движение ротора: величина тока задает крутящий момент, его динамика влияет на равномерность и т.п.» [9].

Основная классификация драйверов проведена по способу закачки тока в обмотки:

- драйверы постоянного напряжения;
- двухуровневые драйверы
- драйверы с ШИМ.

Основными критериями при выборе драйвера для ШД являются [23]:

- сила тока;
- напряжение питания;
- наличие опторазвязанных входов;
- наличие механизмов подавления резонанса;
- наличие защитных функций;
- наличие микрошаговых режимов [24].

«Желательно, конечно, чтобы максимальная сила тока драйвера была еще на 15–40 % больше. С одной стороны, это даст запас на случай, если вы захотите получить больший момент от мотора, или в будущем поставите более мощный двигатель. С другой стороны, не будет излишней: производители иногда «подгоняют» номиналы радиоэлектронных компонентов к тому или иному виду/размеру двигателей, поэтому слишком мощный драйвер на 8 А, управляющий двигателем NEMA 17 (42 мм), может, к примеру, вызывать излишние вибрации.

Важный момент — это напряжение питания. Весьма важный и неоднозначный параметр. Его влияние достаточно многогранно — напряжение питания влияет на динамику (момент на высоких оборотах), вибрации, нагрев двигателя и драйвера. Обычно максимальное напряжение питания драйвера примерно равно максимальному току  $I$ , умноженному на 8–10. Если максимальное указанное напряжение питания драйвера резко отличается от данных величин, стоит дополнительно поинтересоваться, в чем причина такой разницы. Чем больше индуктивность двигателя, тем большее напряжение требуется для драйвера.

Существует эмпирическая формула  $U=32\cdot\sqrt{L}$ , где  $L$  — индуктивность обмотки шагового двигателя. Величина  $U$ , получаемая по этой формуле, весьма приблизительная, но она позволяет ориентироваться при выборе драйвера.  $U$  должно примерно равняться максимальному значению напряжения питания драйвера. Если вы получили  $U$  равным 70, то по данному критерию проходят драйверы PLD86, PLD880» [14].

Рассмотрим один из распространённых драйверов более подробно.

Драйвер шагового двигателя модели A4988 - предназначен для управления биполярными ШД, работающими от напряжения 8 - 35 В и потребляющими до 2 А на каждую обмотку двигателя. Драйвер построен на базе одноимённого чипа A4988 производства Allegro, он получил широкое распространение (в роботостроении, станках ЧПУ, 3D принтерах и т.д) благодаря простоте подключения и широкому функционалу [25].

«Характеристики:

- напряжение питания двигателя: 8 ... 35 В;
- максимальный ток на одну обмотку двигателя: 1 А без радиатора, (2 А с радиатором);
- напряжение питания логической части драйвера: 3 ... 5,5 В;
- размер одного шага двигателя: от 1 до 1/16 полного шага;
- защита: от перегрева, от перегрузки по току, от короткого замыкания, от пониженного питания» [7];

– подключение на рисунке 13.

На шине питания двигателя (между выводами  $V_{\text{МOT}}$  и GND) рекомендуется установить электролитический конденсатор, как можно ближе к плате драйвера. Ёмкость конденсатора должна быть не ниже 1000 мкФ, а его рабочее напряжение должно превышать напряжение в шине питания двигателя минимум на 25%.

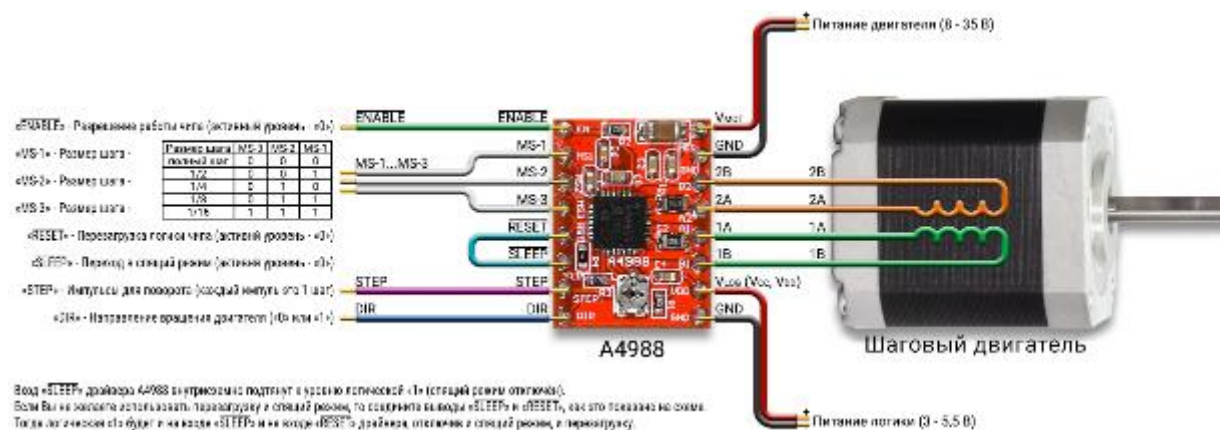


Рисунок 13 – Схема подключения драйвера А4988

Управление ШД осуществляется через входы «ENABLE», «STEP» и «DIR» драйвера (если считать, что выходы «RESET» и «SLEEP» соединены как на схеме рисунка 13). Подача логического «0» на вход «ENABLE» разрешает работу драйвера. С каждым фронтом импульса на входе «STEP», ротор двигателя будет поворачиваться на один шаг, направление поворота которого будет зависеть от логического уровня на входе «DIR».

Например, для ШД модели 17HS1352-P4130 в полношаговом режиме: один оборот ротора состоит из 200 полных шагов, значит за один полный шаг ротор повернётся на  $1,8^\circ$  ( $360^\circ / 200$  шагов). Если подать на вход «STEP» 400 импульсов, при наличии логической «1» на входе «DIR», то ротор двигателя совершит два полных оборота в одну сторону. Если подать на вход «STEP» 400 импульсов, при наличии логического «0» на входе «DIR», то ротор двигателя совершит два полных оборота в другую сторону. Чем выше

частота следования импульсов на входе «STEP», тем быстрее будет осуществляться поворот ротора. Если работа драйвера разрешена (на входе «ENABLE» уровень логического «0») и на вход «STEP» не поступают импульсы, то ротор двигателя будет удерживаться в одном и том же положении, вне зависимости от уровня на входе «DIR». Удержание ротора означает, что его трудно (или невозможно) повернуть, прикладывая внешнюю физическую силу. При подаче логической «1» на вход «ENABLE», драйвер отключится и ротор двигателя освободится, вне зависимости от состояния на остальных входах драйвера.

Драйвер A4988 позволяет выбрать 1 из 5 вариантов размера шага двигателя (см. таблицу на рисунке 13).

Другим распространенным драйвером ШД является модель PLD880-G2 (см. таблица 2) [14].

Таблица 2 – Технические параметры PLD880-G2

| Параметр                                      | Размерность  | Величина                        |
|-----------------------------------------------|--------------|---------------------------------|
| Напряжение питания                            | В            | 18...80 (типовое значение 70 В) |
| Рабочий ток каждого ШД                        | А            | 2.0...8.0                       |
| Деления шага ШД (микрошаг)                    | -            | 1:512                           |
| Частота сигнала STEP / фронт передний         | макс. кГц    | 300                             |
| Максимальная частота вращения вала ШД         | об/мин       | 3000                            |
| Частоты вращения ШД от встроенного генератора | об/мин       | 0...500                         |
| Сопротивление изоляции                        | МОм          | 500                             |
| Рабочая температура                           | °С           | 0...50                          |
| Вес модуля без упаковки                       | кг           | 0.5                             |
| Габаритные размеры (Ш x В x Г)                | мм x мм x мм | 130 x 102 x 60                  |
| Рекомендуемая схема подключения ШД к драйверу | -            | -                               |

«PLD880-G2 — цифровой драйвер шагового двигателя на базе сигнального процессора DSP с возможностью настройки параметров драйвера при помощи ПК по USB интерфейсу. Устройство имеет встроенные цепи защиты от КЗ обмоток ШД, от эффекта обратной ЭДС от ШД;

встроенный компенсатор среднечастотного резонанса ШД; защиту от переплюсовки напряжения питания и схему плавного пуска ШД; демпфер; генератор частоты STEP и защиту от превышения входной частоты STEP. Драйвер работает со стандартным протоколом управления STEP/DIR/ENABLE. Все управляющие входы драйвера оптоизолированы и совместимы с логическими уровнями 2.5 В, 3.3 В, 5 В. Также модуль снабжен режимом AUTO-SLEEP, который включается при отсутствии сигнала STEP. Драйвер оптимально подходит для управления биполярными и униполярными шаговыми двигателями Purelogic R&D серий PL57/PL86» [8]. Также возможна работа с другими ШД.

#### **1.2.4 Контроллеры управления шаговыми двигателями и их возможности**

Контроллеры шагового двигателя - это электрические цепи, используемые для передачи информации в драйвер шагового двигателя, который управляет работой шагового двигателя. Контроллер шагового двигателя может быть включен в конструкцию шагового привода. В некоторых случаях драйверы шаговых двигателей программируются с начальным набором команд, которые не меняются. Эти драйверы являются формой автономного контроллера шагового двигателя. В других случаях программирование драйвера изменяется с помощью отдельного контроллера шагового двигателя для создания различных движений.

Преимущество использования контроллеров шагового двигателя, а не автономных драйверов, заключается в дополнительном управлении функциями двигателя. В то время как базовые шаговые приводы контролируют ограниченное количество функций, контроллеры шаговых двигателей способны управлять движениями в более широком масштабе. Микрошаг, многоосевое управление и другие функции возможны при использовании контроллеров шаговых двигателей. В дополнение к

управлению направлением движения контроллеры шагового двигателя также регистрируют и управляют скоростью и точным расстоянием движения.

Для примера рассмотрим один из них.

Предлагаемый контроллер предназначен для управления униполярным шаговым двигателем со средним током каждой обмотки до 2.5А. Контроллер может использоваться с распространенными шаговыми двигателями типа ДШИ-200-1, -2, -3.

«Главной задачей программы управления работой контроллера является формирование импульсных последовательностей для 4-х обмоток двигателя Основная программа выполняет вычисление мгновенных значений скорости и периода следования шагов, обеспечивая необходимую кривую разгона» [12] (см. рисунок 14).

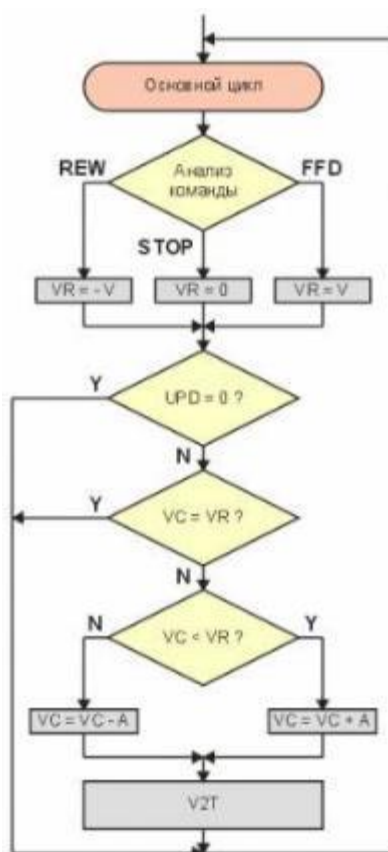


Рисунок 14 – Блок-схема основного алгоритма работы контроллера

Основой устройства является микроконтроллер U1 типа AT90S2313 фирмы Atmel. «Сигналы управления обмотками двигателя формируются на портах PB4 – PB7 программно. Для коммутации обмоток используются по два включенных параллельно полевых транзистора типа КП505А, всего 8 транзисторов (VT1 – VT8). Эти транзисторы имеют корпус ТО-92 и могут коммутировать ток до 1.4А, сопротивление канала составляет около 0.3 ома. Для того, чтобы транзисторы оставались закрытыми во время действия сигнала «сброс» микроконтроллера (порты в это время находятся в высокоимпедансном состоянии), между затворами и истоками включены резисторы R11 – R14. Для ограничения тока перезарядки емкости затворов установлены резисторы R6 – R9. Для подключения шагового двигателя имеется 8-контактный разъем ХРЗ, который позволяет подключить двигатель, имеющий два отдельных вывода от каждой обмотки (как, например, ДШИ-200). Для двигателей с внутренним соединением обмоток один или два общих контакта разъема останутся свободными» [18].

### **1.3 Вентильные двигатели**

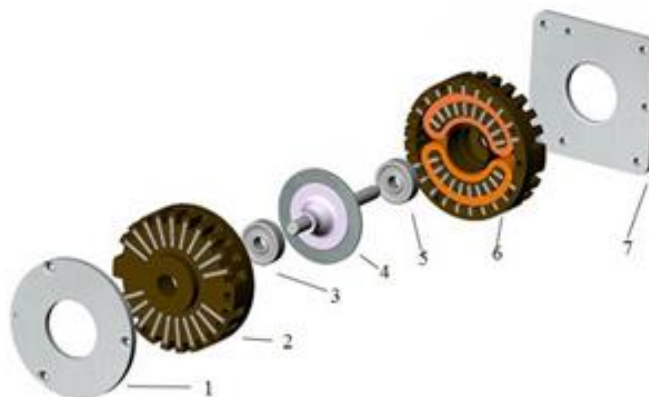
#### **1.3.1 Конструкция и принцип действия вентильных двигателей**

«Конструктивно ВД состоит из трех функциональных узлов: двигателя, датчика положения ротора, инвертора-коммутатора (см. рисунок 15). В настоящее время используются две различные схемы управляемых ВД, отличающиеся типом обратной связи по положению ротора.

В первом варианте используется дискретный датчик положения, что приводит к сужению границ устойчивости, повышению колебательности и увеличению неравномерности вращения на низких скоростях.

Во втором варианте используется аналоговый датчик (ВТ, элемент Холла, сельсин, микросин), с помощью которого модуляция ключей

инвертора близка к синусоидальной. Это расширяет диапазон регулирования, снижает пульсации и неравномерность вращения» [2].



1 – задняя часть корпуса; 2 – статор; 3 – подшипник; 4 – магнитный диск (ротор); 5 – подшипник; 6 – статор с обмоткой; 7 – передняя часть корпуса

Рисунок 15 – Вентильный двигатель

«У вентильного двигателя имеется взаимосвязь между многофазной обмоткой статора и ротора. У них присутствуют постоянные магниты и встроенный датчик положения. Коммутация прибора реализуется при помощи вентильного преобразователя, вследствие чего он и получил такое название.

Схема вентильного двигателя состоит из задней крышки и печатной платы датчиков, втулки подшипника, вала и самого подшипника, магнитов ротора, изолирующего кольца, обмотки, трельчатой пружины, промежуточной втулки, датчика Холла, изоляции, корпуса и проводов (см. рисунок 15)» [3]. Принцип действия ВД подробно рассмотрен в [12]

ВД классифицируются:

а) по типу питания:

- 1) ВД постоянного тока;
- 2) ВД переменного тока;

б) по способу взаимодействия магнитного поля статора и ротора:

- 1) синхронные;

2) асинхронные;

3) индукторные;

в) по числу задействованных фаз:

1) однофазные;

2) двухфазные;

3) трехфазные – «наиболее распространенные варианты, способные выдать плавный пуск и нормальный режим работы вентильного двигателя. Характеризуется четным количеством обмоток и хорошими тяговыми характеристиками. К его недостаткам относят лишь чрезмерный шум во время работы» [22];

4) четырехфазные.

«К преимуществам вентильных двигателей относят:

– относительно небольшая величина магнитных потерь из-за отсутствия постоянно действующего поля, как в классических синхронных и асинхронных электродвигателях;

– обеспечивает безопасное вращение даже с максимальной нагрузкой, в отличие от коллекторных электродвигателей;

– за счет встроенного преобразователя частоты коммутация вентильного преобразователя обеспечивает широкий спектр скоростей вращения, которые отличаются плавным переходом от одной к последующей;

– хорошая динамика работы и точность позиционирования, способная создать конкуренцию шаговым двигателям;

– относительно большая степень надежности и длительный срок эксплуатации без обслуживания за счет отсутствия скользящего контакта, в отличие от коллекторных двигателей.

К недостаткам вентильных агрегатов следует отнести их высокую себестоимость, наличие дополнительных элементов, усложняющих последующую эксплуатацию» [6].

### 1.3.2 Ассортимент вентильных двигателей на мощности от 10 до 100 Вт

В связи с очень большим количеством различных типов и конструкций ВД ассортимент рассмотрим двумя частями. Первая часть в виде таблицы 3. Вторая часть в приложении Б.

Таблица 3 – Ассортимент ВД

| Тип                                                          | Производитель  | Технические параметры |               |                                   |                                           | Внешний вид                                                                           |
|--------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                              |                | Диаметр корпуса, мм   | Мощность, Вт  | Номинальный крутящий момент, мН·м | Частота вращения на холостом ходу, об/мин |                                                                                       |
| Прецизионные, постоянного тока, с полым ротором              | Faulhaber      | 3...44                | 0,0063...212  | 0,023...202                       | 5300...46500                              |   |
| Многополюсные, постоянного тока                              | Dunkermotoren  | 32,4...95             | 6...1100      | 0,026...2,9                       | до 4050                                   |  |
| Малогабаритный, постоянного тока                             | Nanotec        | 22...87               | 3,8...750     | 0,008...2,1                       | до 14000                                  |  |
| Малогабаритный, постоянного тока, со встроенным контроллером | Georgii Kodold | 65...94               | 70...430      | 0,22...1,8 Н·м                    | до 3750                                   |  |
| Малогабаритный, постоянного тока,                            | Eibl DHT       | 63...225              | 0,06...94 кВт | 0,56...301 Н·м                    | до 3000                                   |  |

При выборе конкретной модели важно определить ее соответствие месту установки, поэтому важно обращать внимание на следующие характеристики вентильных двигателей: номинальное напряжение, потребляемая мощность, КПД, мощность на валу, номинальная частота, диапазон регулировки частоты, номинальный крутящий момент, коэффициент нагрузки, габаритные размеры и масса.

### **1.3.3 Драйверы для питания обмоток вентильных двигателей**

Драйверы управления работой ВД разных производителей выполняют примерно одинаковые функции, принцип работы примерно одинаков. Для примера рассмотрим продукцию компании Texas Instruments (TI), одного из лидеров в данной отрасли.

«Драйверы TI для бесколлекторных двигателей (или BLDC), могут включать интегрированный силовой мост или использовать внешние силовые транзисторы. Схема формирования 3-фазных сигналов управления также может быть внешней или встроенной.

Семейство драйверов для управления бесколлекторными электродвигателями включает модели с разным принципом управления и с различным крутящим моментом» [10].

«Для контроля текущего положения вращающегося ротора могут использоваться внешние датчики разных типов или схема управления с определением позиции ротора по величине противо-ЭДС (Back Electromotive Force, BEMF).

Управление может выполняться с помощью ШИМ, аналоговых сигналов или через стандартные цифровые интерфейсы. Наборы настраиваемых параметров для управления вращением могут храниться во внутренней энергонезависимой памяти» [15].

На рисунке 16, представлен работающий в широком диапазоне температур 40...125°C интеллектуальный драйвер для BLDC со встроенными

силовыми ключами на полевых транзисторах, с сопротивлением открытого канала лишь 250 мОм. При диапазоне рабочих напряжений 8...28 В драйвер может обеспечивать номинальный ток 2 А и пиковый ток 3 А.

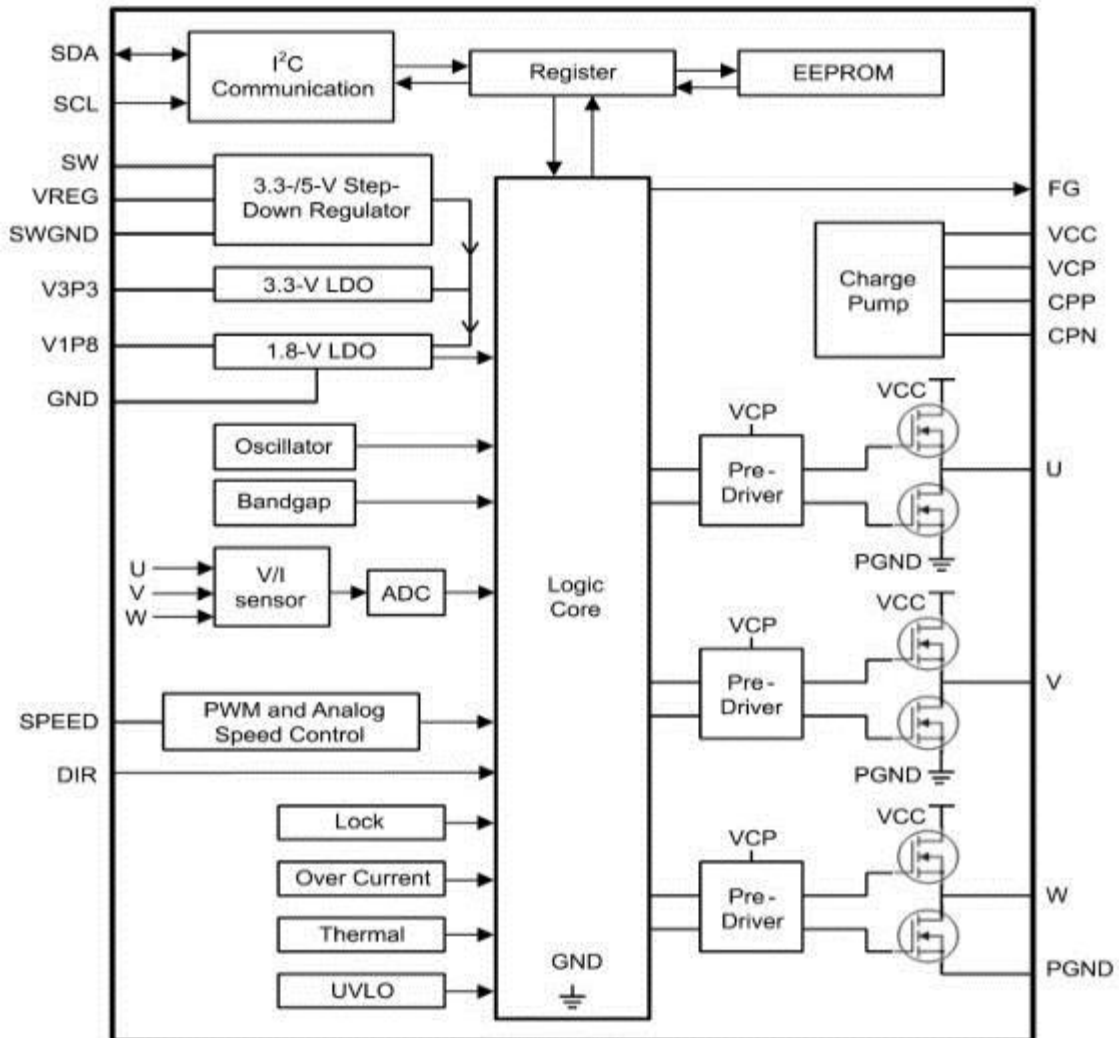


Рисунок 16 – Блок-схема драйвера DRV10983

Драйвер не требует внешнего датчика для контроля положения ротора, но может использовать внешний резистор для контроля потребляемой двигателем мощности. DRV10983 отличается незначительным энергопотреблением, составляющим всего 3 мА, в дежурном режиме.

### 1.3.4 Контроллеры управления вентильными двигателями и их возможности

Для управления бесколлекторными моторами используют специальные контроллеры — ESC (Electric speed controller — электронный контроллер скорости) регуляторы.

«Для запуска электродвигателя в работу в основном используется трехступенчатый алгоритм (см. рисунок 17), состоящий из следующих этапов:

- предстартовая установка ротора (park);
- частотный запуск двигателя в разомкнутой системе (open loop start);
- работа с использованием определения положения ротора (closed loop run)» [19].

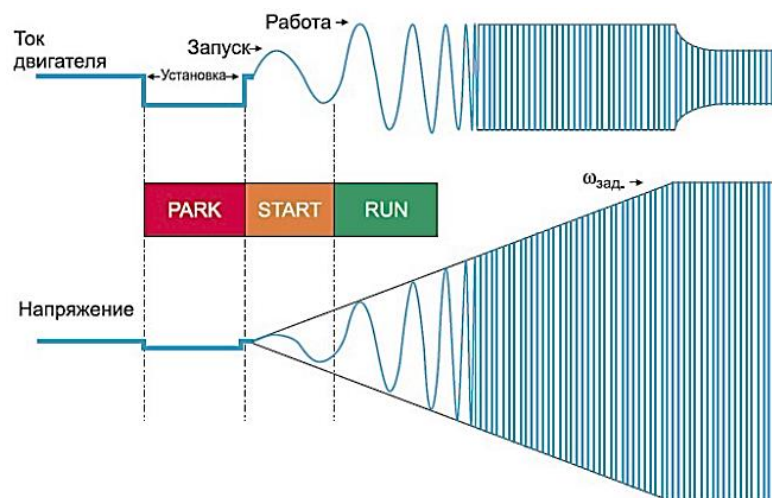


Рисунок 17 – Алгоритм запуска двигателя с постоянными магнитами

«На первом этапе в фазы двигателя подается постоянный ток в течение заданного времени. При этом ротор ориентируется по оси созданного магнитного поля. Затем, на втором этапе, начинается частотный разгон двигателя, частота приложенного к двигателю напряжения увеличивается с интенсивностью, определяемой максимальным моментом двигателя

и моментом инерции системы. При этом момент, развиваемый двигателем, пропорционален току статора и углу рассогласования его с полем ротора. Если момент, развиваемый двигателем, больше момента сопротивления, ротор двигателя приобретает угловое ускорение. С ростом частоты вращения ротора увеличивается величина ЭДС вращения двигателя; при определенном значении этой ЭДС контроллер переходит в режим управления с определением положения ротора и начинается третий этап работы.

На рисунке 18 приведен алгоритм определения положения ротора. С шунта, установленного в звене постоянного тока преобразователя (DC bus current), снимается информация о токе двигателя.

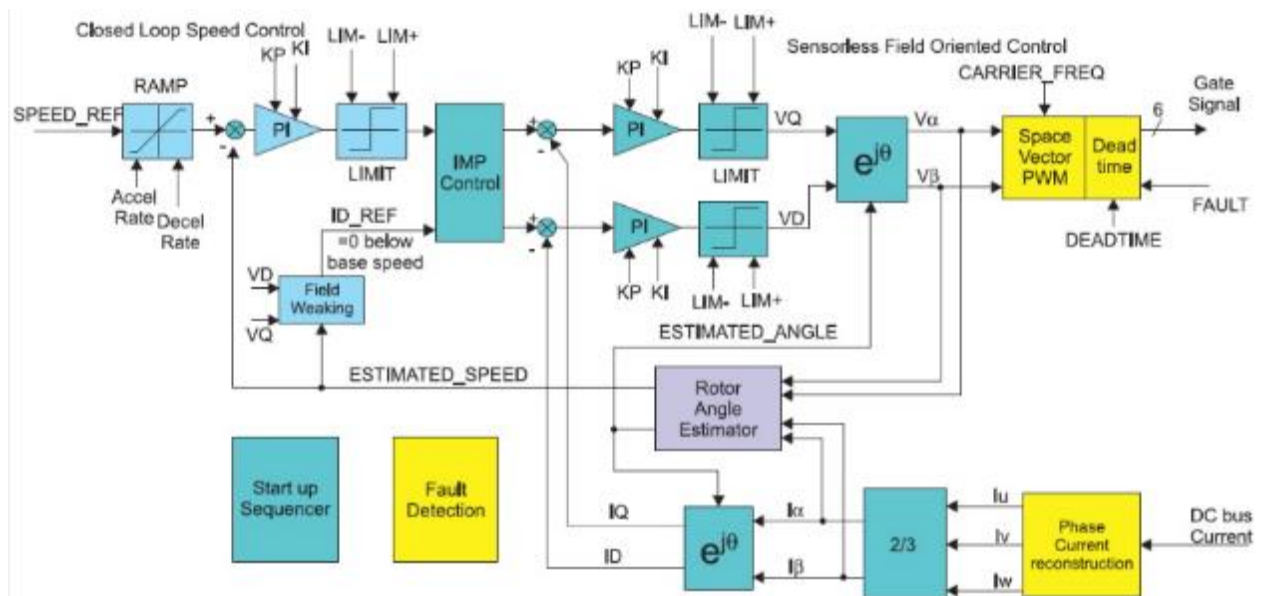


Рисунок 18 – Схема определения положения ротора двигателя с постоянными магнитами без датчика положения ротора

Система вычисления токов фаз Phase Current reconstruction при двух известных состояниях ключей инвертора, соответствующих двум соседним элементарным положениям вектора напряжения, определяет токи в двух фазах и рассчитывает ток в третьей фазе» [20]. Далее по этим значениям токов фаз рассчитываются эквивалентные токи в двухфазной системе координат  $\alpha, \beta$ .

Таблица с основными параметрами некоторых контроллеров скорости в диапазоне мощностей до 100 Вт приведена в приложении В.

#### **1.4 Задачи бакалаврской работы**

Анализ шаговых и вентильных двигателей и систем управления их работой показал, что в настоящее время они широко применяются в автоматизированных системах управления от ЭВМ и микропроцессорных устройств. Основной задачей, которую необходимо решить во второй главе - подобрать нескольких комплектов электроприводов, в основе которых лежат микродвигатели различных типов, для выполнения перемещения рабочего органа объекта, в частности, печатающей головки 3D-принтера, вдоль одной координаты, а в третьей главе сравнить их с экономической точки зрения.

#### **Выводы**

Среди различных приводов, применение которых возможно в качестве источника перемещения печатающей головки 3D-принтера, предпочтительно использовать электрический привод, позволяющий получить наиболее высокую степень позиционирования. Для данных электроприводов наиболее подходящими являются гибридные шаговые двигатели, позволяющие получить угловое перемещение менее одного градуса поворота ротора.

## 2 Разработка узла однокоординатного перемещения объекта

### 2.1 Узел на основе контроллера SMSD-1.5Modbus с шаговым двигателем FL42STH

В первом варианте был выбран гибридный ШД FL42STH33-1334MA (таблица 4):

- FL и STH: обозначают тип двигателя;
- 42: размер фланца 42х42 мм;
- 33: длина двигателя в мм;
- 133: ток фазы двигателя, умноженное на  $10^2$  А;
- 4: количество выводов, двухфазный;
- М: шаг двигателя  $0,9^\circ$  ;
- А: выход вала с одной стороны [11].

Таблица 4 – Технические характеристики ШД FL42STH33-1334MA

| Потребляемая мощность, Вт | Единичный шаг, град | Напряжение питания, В | Ток /фаза, А | Индуктивность / фаза, мГн | Сопротивление / фаза, Ом | Число фазных обмоток | Крутящий момент, кгс·см | Момент инерции и ротора, г·см <sup>2</sup> |
|---------------------------|---------------------|-----------------------|--------------|---------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------------------------|
| 2.66...13.3               | 0,9                 | 2-10                  | 1,33         | 4,2                       | 2,1                      | 2                    | 2,2                     | 35                                         |

Контроллер шагового двигателя SMSD-1.5Modbus, предназначен для работы с двигателями, токи в обмотках, которых не превышают 1.5А. Контроллер может управляться от ПЛК по протоколу Modbus RTU/ASCII, а также работать автономно по заданной программе. Контроллер поддерживает режимы дробления от полношагового до 1/256, что обеспечивает низкий уровень вибрации и высокую точность позиционирования [21]. Основные параметры контроллера показаны в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры контроллера SMSD-1.5Modbus

| Параметр                                                                         | Значение                                                        |       |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------|
|                                                                                  | мин.                                                            | макс. |
| Напряжение питания, В                                                            | 12                                                              | 48    |
| Ток обмоток двигателя, А                                                         | 0,15                                                            | 1,5   |
| Напряжение установки логического входа, В                                        | -                                                               | 2,4   |
| Напряжение сброса логического входа, В                                           | 0,7                                                             | -     |
| Напряжение логического выхода транзисторного типа, В                             | -                                                               | 80    |
| Нагрузочная способность логического выхода транзисторного типа, мА               | -                                                               | 50    |
| Напряжение логического выхода релейного типа AC/DC, В                            | -                                                               | 350   |
| Нагрузочная способность логического выхода релейного типа DC(AC/DC), мА          | -                                                               | 250   |
| Нагрузочная способность выхода вспомогательного питания +5В, мА                  | -                                                               | 200   |
| Продолжительность высокого логического уровня сигнала STEP в режиме драйвера, нс | 250                                                             | -     |
| Продолжительность низкого логического уровня сигнала STEP в режиме драйвера, нс  | 250                                                             | -     |
| Продолжительность высокого логического уровня для входов IN0 и IN1, нс           | 70                                                              | -     |
| Продолжительность низкого логического уровня для входов IN0 и IN1, нс            | 70                                                              | -     |
| Продолжительность высокого логического уровня для входов IN2...IN7, мкс          | 5                                                               | -     |
| Частота генерации ШИМ-сигнала, Гц                                                | 0,015                                                           | 5000  |
| Время обработки одной базовой инструкции, мкс                                    | 185                                                             | -     |
| Поддерживаемые скорости передачи данных по RS-485, бод/с                         | 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 14400, 19200, 38400, 57600, 115200 |       |
| Дробление полного шага                                                           | 1/1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/128, 1/256                    |       |
| Поддерживаемые протоколы                                                         | Modbus RTU, Modbus ASCII                                        |       |
| Язык программирования                                                            | IL (Instruction List), LD (Ladder Diagram)                      |       |

Протокол Modbus – это сетевой протокол прикладного уровня, предназначенный для обмена данными между технологическими объектами в машиностроении. Разработан в 1979 году. На сегодня на него приходится около 10% рынка промышленных сетей. Modbus построен на архитектуре «мастер-подчиненный», которое подразумевает наличие в сети ведущего устройства, управляющего работой ведомых устройств.

## 2.2 Узел на основе контроллера ECSON Module 24/2 с вентильным двигателем ECX SPEED 13M

Для второй комплектации узла перемещения печатающей головки 3D-принтера выбрали следующую комплектацию на основе вентильного двигателя (BLDC):

- бесколлекторный вентильный двигатель BLDC Ø13 мм: модель ECX SPEED 13M, 12 Вт, 2.7 мН·м, 50000 об/мин (таблица 6);
- контроллер управления двигателем BLDC модели ECSON Module 24/2 [31].

Таблица 6 – Параметры вентильного двигателя ECX SPEED 13M

| Параметр                                        | Величина                |
|-------------------------------------------------|-------------------------|
| Данные двигателя                                |                         |
| Стадия жизненного цикла                         | Стандартный             |
| Номинальное напряжение                          | 24 В                    |
| Скорость холостого хода                         | 44500 об/мин            |
| Ток холостого хода                              | 154 мА                  |
| Номинальная скорость                            | 40000 об/мин            |
| Номинальный момент (макс. длительный момент)    | 2.74 мНм                |
| Номинальный ток (макс. длительный ток)          | 0.687 А                 |
| Пусковой момент                                 | 28,4 мНм                |
| Пусковой ток                                    | 5,68 А                  |
| Макс. КПД                                       | 71 %                    |
| Параметры двигателя                             |                         |
| Сопротивление между выводами                    | 4,22 Ом                 |
| Индуктивность между выводами                    | 0.117 мГн               |
| Моментная постоянная                            | 5 мНм/А                 |
| Скоростная постоянная                           | 1910 об/мин/В           |
| Крутизна механической характеристики            | 1610 об/мин/мНм         |
| Механическая постоянная времени                 | 4.12 мс                 |
| Момент инерции ротора                           | 0.244 г·см <sup>2</sup> |
| Тепловые параметры                              |                         |
| Тепловое сопротивление: корпус-окружающая среда | 29.5 К/Вт               |
| Тепловое сопротивление: обмотка - корпус        | 2.21 К/Вт               |
| Тепловая постоянная времени обмотки             | 1.31 с                  |
| Тепловая постоянная времени двигателя           | 355 с                   |
| Температура окружающей среды                    | -20...+100 °С           |

Продолжение таблицы 6

|                                                         |                      |
|---------------------------------------------------------|----------------------|
| Максимальная температура обмотки                        | 155 °С               |
| Механические параметры                                  |                      |
| Тип подшипников                                         | шариковые подшипники |
| Макс. скорость                                          | 50000 об/мин         |
| Осевое биение                                           | 0 ...0,28 мм         |
| Макс. осевая нагрузка на вал (динамическая)             | 1.5 Н                |
| Максимальное усилие для прессовой посадки (статическое) | 50 Н                 |
| Макс. усилие для прессовой посадки (с упором вала)      | 1500 Н               |
| Макс. радиальная нагрузка                               | 6 Н, 5 мм от фланца  |
| Другие параметры                                        |                      |
| Число пар полюсов                                       | 1                    |
| Число фаз                                               | 3                    |
| Масса                                                   | 24,1 г               |
| Диаметр                                                 | 13 мм                |
| Длина                                                   | 37 мм                |
| Семейство                                               | ECX SPEED            |
| Серия                                                   | ECX SPEED 13 M       |
| Присвоенная мощность                                    | 12 Вт                |

Контроллер ESCON – небольшой мощный 4-квadrантный ШИМ сервоконтроллер для эффективного управления коллекторными двигателями постоянного тока с постоянными магнитами. Обеспечивает регулирование скорости с замкнутой и разомкнутой обратной связью и регулирование тока [30]. Управление сервоконтроллерами ESCON осуществляется путем изменения значений аналоговых и цифровых входов. Конфигурация аналоговых и цифровых входов и выходов ведется в графической среде «ESCON Studio», разработанной для ПК на базе Windows (см. таблицу 7)

Таблица 7 – Основные параметры контроллера ECSON Module 24/2

| Наименование параметра                                               | Единица измерения | Величина |
|----------------------------------------------------------------------|-------------------|----------|
| Общие                                                                |                   |          |
| Мощность управляемого двигателя                                      | Вт                | До 48    |
| Датчики (выбор комплектации при заказе)                              |                   |          |
| Цифровой инкрементальный энкодер (2 канала с или без драйвера линии) | -                 | -        |
| Тахогенератор                                                        | -                 | -        |

Продолжение таблицы 7

| Наименование параметра                                                       | Единица измерения | Величина                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------|
| Цифровые датчики Холла (бесколлекторные двигатели)                           | v                 | v                                                        |
| Режим работы (выбирается ПО)                                                 |                   |                                                          |
| Управление током (моментом)                                                  | -                 | -                                                        |
| Управление скоростью (с и без обратной связи)                                | -                 | -                                                        |
| Электрические характеристики                                                 |                   |                                                          |
| Рабочее напряжение $V_{CC}$                                                  | В, пост           | 10-24                                                    |
| Макс. выходное напряжение                                                    | В                 | $0,98 \cdot V_{CC}$                                      |
| Макс. выходной ток                                                           | А                 | 4                                                        |
| Длительно допустимый выходной ток                                            | А                 | 2                                                        |
| Частота ШИМ                                                                  | кГц               | 53,6                                                     |
| Частота дискретизации ПИ регулятора тока                                     | кГц               | 53,6                                                     |
| Частота дискретизации ПИ регулятора скорости                                 | кГц               | 53,6                                                     |
| Макс. КПД                                                                    | %                 | 92                                                       |
| Макс. скорость (бесколлекторный, 1 пара полюсов)                             | об/мин            | 150000                                                   |
| Встроенный дроссель двигателя, на фазу                                       | -                 | -                                                        |
| Входы/выходы                                                                 |                   |                                                          |
| Сигналы датчика Холла                                                        | -                 | H1, H2, H3                                               |
| Макс. входная частота энкодера (дифференциальный вход) (несимметричный вход) | -                 | 1 МГц (100 кГц)                                          |
| Потенциометры                                                                | ед                | 2                                                        |
| Цифровые входы                                                               | ед                | 2                                                        |
| Цифровые входы/выходы                                                        | ед                | 2                                                        |
| Аналоговые входы:                                                            | ед                | 2                                                        |
| разрешение                                                                   | бит               | 12                                                       |
| диапазон                                                                     | В                 | -10...+10                                                |
| схема                                                                        | -                 | дифференциально                                          |
| Аналоговые выходы                                                            |                   |                                                          |
| разрешение                                                                   |                   | 12                                                       |
| диапазон                                                                     |                   | -4...+4                                                  |
| макс. выходной ток                                                           |                   | 1 mA                                                     |
| Дополнительный выход напряжения питания                                      | В                 | +5                                                       |
| Напряжение питания датчика Холла                                             | В                 | +5                                                       |
| Индикаторы состояния                                                         | -                 | Работа: зеленый светодиод /<br>Ошибка: красный светодиод |

В зависимости от варианта контроллер ESCON может поддерживать следующие типы двигателей:

- коллекторные двигатели: коллекторные двигатели с постоянными магнитами;

- бесколлекторные двигатели: бесколлекторные, с электронной коммутацией двигатели постоянного тока с постоянными магнитами с датчиками Холла (BLDC) [29].

Различные режимы работы позволяют использовать контроллер для широкого диапазона приводов. Управление током: контроллер тока сравнивает текущий ток двигателя (момент) с заданным значением. В случае отклонения, ток двигателя автоматически корректируется. Регулятор скорости: регулятор скорости сравнивает текущую скорость с заданной. В случае отклонения, скорость автоматически корректируется. Управление скоростью: питание двигателя осуществляется напряжением, пропорциональным заданному значению скорости. Изменения нагрузки компенсируются методом  $I \times R$  [28].

Измерение скорости с помощью:

- цифрового инкрементального энкодера: энкодеры выдают прямоугольные импульсы для дальнейшей обработки. Эти импульсы подсчитываются для определения скорости. Сигналы каналов А и В, сдвинутые по фазе, сравниваются для определения направления вращения;
- тахогенератора: аналоговое напряжение тахогенератора пропорционально скорости;
- датчиков Холла: датчики Холла имеют 6 различных комбинаций импульсов на оборот, которые подсчитываются для определения скорости. Они также выдают сдвинутые по фазе сигналы, которые сравниваются для определения направления вращения;
- электронная коммутация без датчиков: скорость определяется по изменению индуцируемого в обмотке напряжения (ЭДС). Электроника выделяет момент перехода ЭДС через нуль.

Могут быть назначены различные функции входов и выходов. Заданное значение (скорости или тока), ограничение тока, смещение могут быть назначены следующим образом:

- аналоговое значение: определяется аналоговым напряжением; задаваемым при помощи внешнего или внутреннего потенциометра;
- значение ШИМ: определяется частотой и амплитудой. Желаемое изменение достигается изменением скважности на 10...90%;
- дистанционное сервоуправление: значение задается импульсным сигналом продолжительностью от 1.0 до 2.0 мс.;
- фиксированное значение: определяется фиксированным предустановленным значением;
- 2 фиксированных значения: значение 1 определяется фиксированной предустановкой 1. Значение 2 определяется фиксированной предустановкой 2. Цифровой вход используется для переключения между двумя значениями.

Настройка параметров привода проводится с помощью специализированного ПО для ОС Windows.

Комплект поставки:

- контроллер;
- кабель USB type A – micro B;
- материнская плата для ESCON Module 24/2;
- USB флэш-диск ESCON с ПО [27].

### **2.3 Узел на основе линейного серводвигателя ServoTube STA11 и контроллера Accelnet ADP-055-18**

Линейные серводвигатели Dunkermotoren серии ServoTube — «двигатели прямого привода, предназначенные для реализации работы в режиме актуатора (подвижный шток двигателя). В состав двигателя входит интегрированный датчик обратной связи по положению, обеспечивающий повторяемость до 12 микрон.

В линейные серводвигатели Dunkermotoren интегрированы линейные подшипники, обеспечивающие долгий срок службы изделия и не требующие

дополнительной смазки и другого обслуживания. Все двигатели соответствуют промышленным стандартам, что позволяет провести их быстрое внедрение в уже работающие системы. Предлагается большое количество аксессуаров для интеграции актуаторов на базе линейных серводвигателей на замену пневмоцилиндров» [13].

Предлагаемые актуаторы характеризуются классом защиты по IP67 и развивают постоянное рабочее усилие от 7 до 276 Н при долговременных нагрузках. Для комплектации с двигателями предлагаются различные управляющие контроллеры от производителя двигателей [27]

Выбрали модель STA1104 со следующими основными характеристиками:

- развиваемое продолжительное усилие - 6Н;
- развиваемое пиковое усилие - 46Н;
- величина максимального хода - 14 ... 245 мм;
- развиваемая скорость(м/с) /ускорение - 5,3/407 м/с<sup>2</sup>;
- повторяемость – 12 мкм;
- точность – 350 мкм [26].

Он состоит из силового механизма со встроенными пластиковыми подшипниками и упорного стержень. Встроенные подшипники действуют как направляющая для движущегося упорного стержня. Он не предназначен для того, чтобы выдерживать боковые нагрузки [25].

Схема подключения двигателя STA1104 к контроллеру Accelnet ADP-055-18 показана на рисунке 19.

Контроллеры Copley серий Accelnet и AccelnetPlus предназначены для управления коллекторными и бесколлекторными двигателями, включая линейный с различной обратной связью [25].

В рамках серии предлагаются контроллеры различных форм-факторов и развиваемой мощности. Контроллеры имеют от 8 до 12 цифровых входов и от 2 до 4 цифровых выходов.

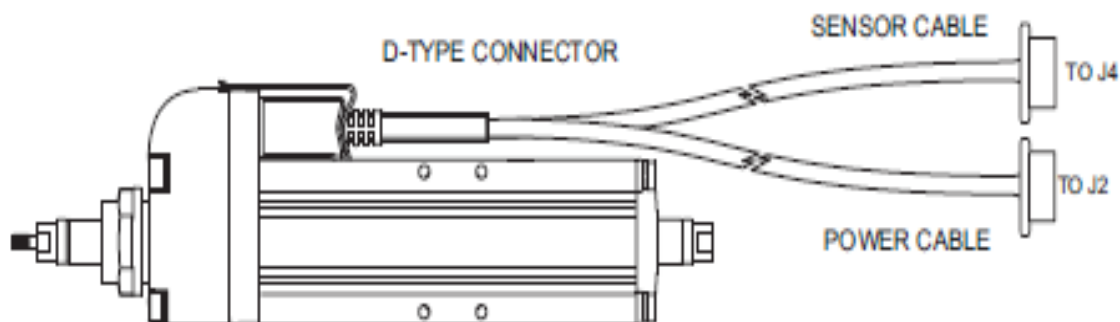


Рисунок 19 – Схема подключения двигателя STA1104 к контроллеру Accelnet ADP-055-18

В качестве задающего воздействия может использоваться аналоговый сигнал по напряжению формата  $\pm 10\text{В}$ . Развиваемый ток постоянной работы - до  $12\text{А}$  [24].

#### Выводы

Мы выбрали контроллер Accelnet ADP-055-18 со следующими основными данными:

- питающее напряжение DC 20-55 В;
- развиваемый ток (А):
  - а) номинальный 6А;
  - б) пиковый 18А;
- интерфейсы: CAN, RS232\$
- контуры управления: по току, по скорости, по положению датчика.

### 3 Сравнение и формирование рекомендаций по применению

#### 3.1 Сравнение вариантов узлов однокоординатного перемещения по сметной стоимости

Для упрощенного расчета сметной стоимости необходимо составить перечень оборудования для каждого варианта (см. таблицу 8) и трудоемкость электромонтажных работ электропривода на 3D-принтер, также по вариантам (см. таблицу 9). Затем определить сметную стоимость по каждому варианту [22].

Таблица 8 – Перечень оборудования для вариантов ЭП

| Номер варианта              | Наименование оборудования                                                     | Марка, модель тип   | Кол-во | Цена, т.руб | Стоимость, т.руб |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------|--------|-------------|------------------|
| 1 – с шаговым двигателем    | Шаговый двигатель                                                             | FL42STH33-1334MA    | 1      | 2283        | 2283             |
|                             | Контроллер                                                                    | SMSD-1.5Modbus      | 1      | 6140        | 6140             |
|                             | Соединительные провода, шлейфы, разъемы                                       | -                   | -      | -           | 500              |
| Итого                       |                                                                               |                     |        |             | 8923             |
| 2 – с вентильным двигателем | Вентильный двигатель                                                          | ECX SPEED 13M       | 1      | 1670        | 1670             |
|                             | Комплект: контроллер, USB кабель, материнская плата, USB флэш-диск ESCON с ПО | ECSON Module 24/2   | 1      | 7520        | 7520             |
| Итого                       |                                                                               |                     |        |             | 9190             |
| 3 – с линейным двигателем   | Линейный серводвигатель                                                       | STA1104             | 1      | 8475        | 8475             |
|                             | Контроллер                                                                    | Accelnet ADP-055-18 | 1      | 25500       | 25500            |
|                             | Переходные разъемы                                                            | -                   | -      | 240         | 240              |
| Итого                       |                                                                               |                     |        |             | 34215            |

Таблица 9 – Трудоемкости работ по монтажу ЗП на 3D принтер

| Наименование работ              | Характеристика работ                                                 |       |       |                              |       |       |                                |       |       |                                |       |       |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------|-------|------------------------------|-------|-------|--------------------------------|-------|-------|--------------------------------|-------|-------|
|                                 | Тарифный разряд выполняемой работы                                   |       |       | Часовая тарифная ставка, руб |       |       | Трудоемкость работы, нормо-час |       |       | Тарифная заработная плата, руб |       |       |
|                                 | 1 вар                                                                | 2 вар | 3 вар | 1 вар                        | 2 вар | 3 вар | 1 вар                          | 2 вар | 3 вар | 1 вар                          | 2 вар | 3 вар |
| Сборка                          | 2                                                                    | 2     | 3     | 120                          | 120   | 160   | 2,5                            | 2,5   | 6,0   | 300                            | 300   | 960   |
| Монтаж                          | 3                                                                    | 3     | 4     | 160                          | 160   | 200   | 4,0                            | 4,0   | 5,5   | 640                            | 640   | 1100  |
| Испытание                       | 3                                                                    | 3     | 4     | 160                          | 160   | 200   | 3,0                            | 3,0   | 3,0   | 480                            | 480   | 600   |
| Отладка                         | 4                                                                    | 4     | 5     | 200                          | 200   | 240   | 4,0                            | 5,0   | 8,0   | 800                            | 1000  | 1920  |
| Итого                           |                                                                      |       |       |                              |       |       |                                |       |       | 2220                           | 2420  | 4580  |
| Итого тарифная ЗП по вариантам: | 1 вариант – 2220 руб<br>2 вариант – 2420 руб<br>3 вариант – 4580 руб |       |       |                              |       |       |                                |       |       |                                |       |       |

Дальнейший расчет по определению сметной стоимости по вариантам представим в виде таблицы 10.

Таблица 10 – Расчет сметной стоимости

| Показатель                            | Расчетная формула                | Величина, руб |           |           |
|---------------------------------------|----------------------------------|---------------|-----------|-----------|
|                                       |                                  | 1 вариант     | 2 вариант | 3 вариант |
| Стоимость оборудования ССт            | См. табл. 3.1                    | 8923          | 9190      | 34215     |
| Тарифная заработная плата ЗПтар       | См. табл. 3.2                    | 2220          | 2420      | 4580      |
| Дополнительная заработная плата ЗПдоп | $ЗП_{доп} = ЗП_{тар} \cdot 0,12$ | 266,4         | 290,4     | 549,6     |

Продолжение таблицы 10

| Показатель                                       | Расчетная формула                             | Величина, руб |           |           |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------|-----------|
|                                                  |                                               | 1 вариант     | 2 вариант | 3 вариант |
| Доплата по РК и ДВ                               | $R_{КиДВ} = 3Птар \cdot 0,6$                  | 1332          | 1452      | 2748      |
| Расчет страховых взносов                         | $3Пстрахвзн = (3Птар + 3Пдоп + R_{КиДВ})0,3$  | 1145,52       | 1248,72   | 2363,28   |
| Общий фонд оплаты труда                          | $ФОТ = 3Пстрахвзн + 3Птар + 3Пдоп + R_{КиДВ}$ | 4963,92       | 5411,12   | 10240,88  |
| Расчет затрат на эксплуатацию машин и механизмов | $ЭМиМ = ФОТ \cdot 0,08$                       | 397,11        | 432,88    | 819,27    |
| Стоимость материалов                             | $M = CСт \cdot 0,02$                          | 178,46        | 183,8     | 684,3     |
| Прямые затраты                                   | $ПЗ = ФОТ + ЭМиМ + M$                         | 5539,49       | 6027,8    | 11744,45  |
| Накладные расходы                                | $НР = ФОТ \cdot 0,85$                         | 4219,33       | 4599,45   | 8704,74   |
| Плановые накопления                              | $ПН = ФОТ \cdot 0,65$                         | 3226,54       | 3517,22   | 6656,57   |
| Сметная стоимость                                | $Cсм = ПЗ + НР + ПН$                          | 12985,36      | 14144,47  | 27105,76  |

Наименьшая сметная стоимость составила 12985,36 рублей.

### 3.2 Рекомендации по применению

Как видно из таблицы 10 сметная стоимость ЭП на базе шагового и вентильного электродвигателя примерно одинаковы.

ЭП с линейным приводом значительно превосходит их по величине.

Для окончательного вывода по применению того или иного варианта для узла однокоординатного перемещения учтем, что на малых мощностях до 50 Вт рекомендуется применять шаговые двигатели, обладающие более лучшими энергетическими характеристиками, более простыми в применении, с высокой точностью позиционирования.

Таким образом я бы использовал для 3D-принтера электропривод на основе шагового двигателя в составе ШД FL42STH33-1334MA и контроллера управления его работой SMSD-1.5Modbus.

Если же от 3D-принтера требуется повышенная (прецизионная) точность неизменная достаточно продолжительное время, тогда можно рекомендовать ЭП на основе линейного двигателя.

#### Выводы

Все три рассматриваемых электропривода имеют разную сметную стоимость. Самая низкая стоимость у комплекта с шаговым двигателем, самая высокая у комплекта с линейным двигателем. При этом самая низкая стоимость у вентильного двигателя, а самая низкая стоимость среди управляющих контроллеров – у контроллера управления линейным приводом.

## Заключение

Анализ шаговых и вентильных двигателей и систем управления их работой показал, что в настоящее время они широко применяются в автоматизированных системах управления от ЭВМ и микропроцессорных устройств.

Для этого в первой главе провели обзор имеющихся аналогов, в том числе шаговых и вентильных двигателей с диапазоном мощности от 10 до 100 Вт, рассмотрели их конструкцию, принцип действия, системы управления. Наиболее распространенными являются гибридные шаговые двигатели, позволяющие получить угловое перемещение менее одного градуса поворота ротора. У вентильных двигателей наиболее распространены двигатели с возбуждением от постоянных магнитов.

Во второй главе подобрать несколько комплектов совместимого (согласованного по параметрам) оборудования для выполнения перемещения вдоль одной координаты:

- первый вариант: узел на основе контроллера SMSD-1.5Modbus с шаговым двигателем FL42STH;
- второй вариант: узел на основе контроллера ECSON Module 24/2 с вентильным двигателем ECX SPEED 13M;
- третий вариант: узел на основе линейного серводвигателя ServoTube STA11 и контроллера Accelnet ADP-055-18.

В третьей главе оценена стоимость подобранных комплектов оборудования. Сметная стоимость составила:

- первого варианта 12985,36 руб;
- второго варианта 14144,47 руб;
- третьего варианта 27105,76 руб.

Для применения на 3D-принтере я выбрал электропривод на основе шагового двигателя в составе ШД FL42STH33-1334MA и контроллера управления его работой SMSD-1.5Modbus.

## Список используемых источников

1. Базиненков А.М., Добер В.А. Исследование свойств магнитореологических жидкостей. Машиностроение и компьютерные технологии, №5, 2012 [Электронный ресурс] : научная электронная библиотека «Cyberleninka». URL: <https://cyberleninka.ru/journal/n/mashinostroenie-i-kompyuternye-tehnologii?i=1052951> (дата обращения 11.05.2022)
2. Вентильные двигатели: принцип работы [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Avia-Life». URL: <https://avia-life.com/ventilnye-dvigateli-printsip-raboty/> (дата обращения 20.05.2022)
3. Вентильный двигатель. Принцип работы и управление [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «ASUTPP». <https://www.asutpp.ru/ventilnyj-dvigatel.html> (дата обращения 10.05.2022)
4. Вентильный электропривод прецизионных систем наведения [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Приборостроение». URL: <http://pribor.ifmo.ru/file/journal/139.pdf> (дата обращения 04.06.2022)
5. Гибридный шаговый двигатель [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «SteppRonLine». URL: <https://www.stepperonline.ru/shagovyj-dvigatel-gibridnogo-tipa/> (дата обращения 13.05.2022)
6. Достоинства вентильных электродвигателей [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Peremotka2». URL: <https://www.peremotka2.ru/dostoinstva-ventilnyih-elektrodvigatelay#:~:text=%D0%92%D0%B5%D0%BD%D1%82%0%D1%82%D0%B8%D0%BF%D0%B0> (дата обращения 23.05.2022)
7. Драйвер шагового двигателя A4988 [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «3DiY Shop». URL: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-moduli/drajver-shagovogo-dvigatelya-a4988/> (дата обращения 18.05.2022)

8. Драйвер ШД PLD880-G2 [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Purelogic». URL: <https://purelogic.ru/catalog/22391/> (дата обращения 19.05.2022)

9. Драйверы и контроллеры шаговых двигателей [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «CNC Technology». URL: <https://cnc-tehnologi.ru/drajvery-i-kontrollery-shd> (дата обращения 15.05.2022)

10. Драйверы от ТИ: управляй любым электродвигателем [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Компэл». <https://www.compel.ru/lib/75973> (дата обращения 20.05.2022)

11. Компоненты линейных сервосистем [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Микропривод». URL: <http://www.microprivod.ru/catalog/Dunkermotoren/komponentyi-linejnyix-sistem.html> (дата обращения 30.05.2022)

12. Контроллер шагового двигателя [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Rebooting». URL: <https://www.rebooting.ru/hard/enginecontroller4/> (дата обращения 10.05.2022)

13. Линейные серводвигатели [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Микропривод». URL: <https://3dpt.ru/page/faq> (дата обращения 29.05.2022)

14. Лучшие драйвера для шаговых двигателей [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Все о двигателе». URL: <https://avtika.ru/luchshie-drayvera-dlya-shagovyh-dvigatelay/> (дата обращения 16.05.2022)

15. Модуль драйвера электродвигателя BLDC [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Радиосток». URL: [https://radioskot.ru/publ/modul\\_drajvera\\_motora\\_blcd/1-1-0-1616](https://radioskot.ru/publ/modul_drajvera_motora_blcd/1-1-0-1616) (дата обращения 26.05.2022)

16. Печать-3D [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «3D Today». URL: <https://3dtoday.ru/category/3d-pechat> (дата обращения 10.05.2022)

17. Проблемы качества 3D-печати [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Техно 3D». URL: <https://3dpt.ru/page/faq> (дата обращения 10.05.2022)

18. Разработка контроллера шагового двигателя [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Allbest». URL: [https://knowledge.allbest.ru/radio/3c0a65635a3bc68a4c43a88521206d27\\_0.html](https://knowledge.allbest.ru/radio/3c0a65635a3bc68a4c43a88521206d27_0.html) (дата обращения 10.05.2022)

19. Регуляторы ESC [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «FIXFLY.RU». URL: [https://fixfly.ru/zip?type=1&filter=1102&show\\_all=1](https://fixfly.ru/zip?type=1&filter=1102&show_all=1) (дата обращения 27.05.2022)

20. Регуляторы скорости ESC [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «X-models». URL: <https://xmodels.ru/komplektuyushchie-i-materialy/regulatory-skorosti-esc> (дата обращения 28.05.2022)

21. Сервоприводы: устройство, принцип работы и основные виды [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Амперка». URL: <http://wiki.amperka.ru/articles:servo> (дата обращения 01.06.2022)

22. Трехфазные вентильные двигатели [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «StudFile». URL: <https://studfile.net/preview/1004267/page:17/> (дата обращения 22.05.2022)

23. Шаговые электродвигатели для автоматизации процесса [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Электропривод». URL: <https://electroprivod.ru/stepmotor-automat.htm> (дата обращения 01.06.2022)

24. Шаговый двигатель. Принцип работы и управление [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Purelogic». URL: <https://purelogic.ru/articles/shagovye-dvigateli-printsip-raboty-i-upravlenie/> (дата обращения 12.05.2022)

25. Электропривод на базе шагового двигателя [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «НПО АТОМ». URL: <http://www.nproatom.ru/articles/6> (дата обращения 02.06.2022)

26. Элементы теории вентильного привода [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Лукойл ЭПУ Сервис». URL: <https://lukoil-eru.ru/BLDC/theory> (дата обращения 03.06.2022)

27. Design of a Brushless DC (BLDC) motor controller. Conference: International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT), 2018, At: Dhaka, Bangladesh. URL: [https://www-researchgate-net.translate.googleusercontent.com/publication/271703222\\_Design\\_of\\_a\\_Brushless\\_DC\\_BLDC\\_motor\\_controller](https://www-researchgate-net.translate.googleusercontent.com/publication/271703222_Design_of_a_Brushless_DC_BLDC_motor_controller) (accessed 15.05.2022)

28. DSP stepper motor driver PLD880-G2. Operational manual [Electronic resource]: Information resource "Pumotix". URL: <https://pumotix.com/upload/iblock/3fe/PLD880-G2%20user%20manual.pdf> (accessed 04.06.2022)

29. Gilbertson, Roger G. The 10 (or 11) Basic Ways. Mondo-tronics, Inc. RobotStore.com, 2016.

30. Stepper Drives [Electronic resource]: Information resource "Moon's". URL: <https://www.moonsindustries.com/c/stepper-drives-a0102> (accessed 06.06.2022)

31. Stepper Motor Driver & Controller [Electronic resource]: Information resource "ModBus". URL: <https://www.omc-stepperonline.com/stepper-motor-driver> (accessed 04.06.2022)

## Приложение А

### Шаговые двигатели

Таблица А.1 – Ассортимент шаговых двигателей на мощности от 10 до 100 Вт

| Модель, тип ШД       | Потребляемая мощность, Вт | Единичный шаг, град        | Напряжение питания, В | Ток питания в фазе: ном/макс, А | Индуктивность фазы, мГн | Сопротивление фазы, Ом | Число фазных обмоток | Габаритные размеры: длина (без вала) x ширина x высота, мм | Страна производитель                                               | Масса, кг | Цена, руб |
|----------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|
| ДШИ-200-2            | 11,8                      | 1,8                        | 30                    | 1,5/2,0                         | 3                       | 2,1                    | 4                    | 20,5x58x58 (рис. А.1)                                      | РФ                                                                 | 0,54      | 1700      |
| NEMA 42HM40-1684     | 4,7...6,2                 | 0.9 (1 оборот – 400 шагов) | 2,8                   | 1.68/2.2                        | 3,2                     | 1,65                   | 2                    | 40x42x42 (рис. А.2)                                        | <u>Changzhou Fulling Motor Co.</u> Итало-германо-китайский концерн | 0.35      | 1870      |
| NEMA 34, 86HS78-5504 | 10,4                      | 1.8                        | 1,9                   | ном. 5.5                        | 4                       | 0,46                   | 4                    | 76x86x86 (рис. А.3)                                        | Китай                                                              | 2,3       | 6900      |
| FL42STH33S-0956A     | 3,8...4.8                 | 1.8                        | 4                     | 0.95/1,2                        | 2.5                     | 4.2                    | 6                    | 33.5x42.3x42.3 (рис. А.4)                                  | Fulling Motor, Китай                                               | 0,5       | 3710      |
| ШЭП-42IP65           | 14.4...88                 | 1.8                        | 9...55                | ном. 1.6                        |                         |                        | 4                    | 105x42x42 (рис. А.5)                                       | Электропривод, РФ                                                  | 0,6       | 4750      |

## Приложение Б

### Вентильные двигатели

Таблица Б.1 – Ассортимент вентильных двигателей на мощности от 10 до 100 Вт

| Модель, тип ВД                   | Потребляемая мощность, Вт | Тип / расположение датчиков положения | Напряжение питания, В | Максимальный ток, А | Индуктивность между линиями, мГн | Сопротивление между линиями, Ом | Число полюсов/ фаз/номинальная частота вращения | Габаритные размеры: длина (без вала) x ширина x высота, мм | Страна производитель             | Масса, кг | Цена, руб |
|----------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------|-----------|
| FL57BL(S)                        | 23                        | Холла/120 <sup>0</sup>                | 36                    | 3,5                 | 10                               | 4,1                             | 4/3/4000                                        | 45x57x57 (рис. Б.1)                                        | НПФ Электроприбор, РФ            | 0,25      | 3750      |
| Maxon EC 32 80W                  | 80                        | Холла/120 <sup>0</sup>                | 18                    | 3.82                | 0.09                             | 0.573                           | 1/3/11500                                       | 60x32x32 (рис. Б.2)                                        | Ф.Махон, Швейцария               | 0.27      | 4580      |
| ДБ32-90-10-48-IM3681-C28-P16-L15 | 90                        | Холла/120 <sup>0</sup>                | 48                    | 4.2                 | 5,2                              | 3,8                             | 4/3/10000                                       | 73x32x32 (рис. Б.3)                                        | ЗАО «МЭЛ» Воронеж, РФ            | 0,33      | 4217      |
| 42RBL03A                         | 62                        | Холла/120 <sup>0</sup>                | 24                    | 4,2                 | 6,1                              | 0,9                             | 3/8/4000                                        | 85x42x42 (рис. Б.4)                                        | Jiangsu, Китай                   | 0,7       | 1620      |
| ECO33A                           | 34                        | Бездатчиковый                         | 60                    | 3,24                | 8,8                              | 4,87                            | 4/3/12000                                       | 52x33x33 (рис. Б.5)                                        | АМЕТЕ С Haydon Kerk Pittman, США | 0,62      | 5520      |

## Приложение В

### Контроллеры скорости

Таблица В.1 – Основные параметры контроллеров скорости

| Параметр                    | ESCON 36/2<br>DC                                                                  | ESCON 36/3<br>DC                                                                  | DEC Module<br>24/2                                                                  | EPOS2 24/2                                                                          | EPOS2 Module<br>36/2                                                                | UCC28360                                                                            | CC-32-100                                                                           |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                             |  |  |  |  |  |  |  |
| Двигатель                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |
| Тип двигателя               | DC*                                                                               | BLDC*                                                                             | BLDC                                                                                | BLDC, DC                                                                            | BLDC, DC                                                                            | BLDC                                                                                | BLDC                                                                                |
| Мощность двигателя, Вт      | 72                                                                                | 97                                                                                | 48                                                                                  | 48                                                                                  | 72                                                                                  | 75                                                                                  | 100                                                                                 |
| Электрические параметры     |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |
| Напряжение питания, В       | 10-32                                                                             | 10-36                                                                             | 8-24                                                                                | 2-24                                                                                | 11-36                                                                               | 90-265                                                                              | 24-32                                                                               |
| Номинальный выходной ток, А | 2                                                                                 | 3                                                                                 | 2                                                                                   | 2                                                                                   | 2                                                                                   | 3.2                                                                                 | 3.2                                                                                 |
| Датчики                     |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |
| Энкодер                     | +                                                                                 | -                                                                                 | -                                                                                   | +                                                                                   | +                                                                                   | -                                                                                   | -                                                                                   |
| Датчик Холла (BLDC)         | -                                                                                 | +                                                                                 | -                                                                                   | +                                                                                   | +                                                                                   | -                                                                                   | -                                                                                   |
| Тахогенератор (DC)          | +                                                                                 | -                                                                                 | -                                                                                   | -                                                                                   | -                                                                                   | -                                                                                   | -                                                                                   |
| Без датчика скорости (DC)   | +                                                                                 | -                                                                                 | +                                                                                   | -                                                                                   | -                                                                                   | +                                                                                   | +                                                                                   |
| Без датчика Холла (BLDC)    | -                                                                                 | -                                                                                 | +                                                                                   | -                                                                                   | -                                                                                   | +                                                                                   | +                                                                                   |

\*DC — коллекторный двигатель постоянного тока; BLDC — бесколлекторный двигатель постоянного тока (вентильный двигатель)